

RODRIGO GONÇALVES DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ALARGAMENTO
DE GUIAS DE VÁLVULAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa

**CURITIBA
2004**

TERMO DE APROVAÇÃO

RODRIGO GONÇALVES DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ALARGAMENTO DE GUIAS DE VÁLVULAS

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes
Beltrão
UFPR/PG-MEC CEFET-PR

Prof. Dr. Paulo André de Camargo

Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa
UFPR/PG-MEC
Presidente

Curitiba, 13 de outubro de 2004

Dedico este trabalho
aos meus pais e a
minha esposa Milena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa, pela orientação e apoio à realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec) da Universidade Federal do Paraná, pela assistência prestada ao longo do curso de mestrado.

À empresa Renault do Brasil, por fornecer as ferramentas de corte e a máquina-ferramenta para a realização dos ensaios.

À empresa Quaker Chemical do Brasil, pelo fornecimento e preparo das emulsões de corte.

À empresa Teksid Alumínio do Brasil, pela doação das placas de alumínio.

Aos técnicos de “pre-set” da empresa Kennametal do Brasil (*Tool Management*), pelos ajustes das ferramentas utilizadas nos experimentos.

A todas as pessoas que contribuíram e apoiaram, direta ou indiretamente, a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE GRÁFICOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 ALARGAMENTO	4
2.1.1 Processo de Alargamento	4
2.1.2 Comparação do Alargamento com Outros Processos para o Acabamento de Furos	6
2.1.3 Geometria dos Alargadores	7
2.1.3.1 Aresta secundária de corte – guia	8
2.1.3.2 Ângulo de hélice	9
2.1.3.3 Ângulo de entrada	10
2.1.3.4 Ângulo de saída	11
2.1.4 Materiais dos Alargadores	12
2.1.5 Alargadores Multicortantes	14
2.1.6 Alargadores com Única Aresta de Corte Regulável	15
2.1.7 Parâmetros de Corte para o Alargamento	18
2.1.7.1 Velocidade de corte	18
2.1.7.2 Avanço	19
2.1.7.3 Profundidade de corte	20
2.1.8 Problemas e Soluções Comuns no Processo de Alargamento	21
2.2 FLUIDOS DE CORTE	22
2.2.1 Funções dos Fluidos de Corte	24

2.2.1.1 Lubrificação e refrigeração	25
2.2.2 Tribologia na Interface Cavaco-Ferramenta	27
2.2.2.1 Zonas de aderência e escorregamento	28
2.2.2.2 Temperatura de usinagem	29
2.2.2.3 Mecanismos e formas de desgaste	30
2.2.3 Classificação dos Fluidos de Corte	32
2.2.3.1 Emulsões e aditivos	33
2.2.3.2 Soluções	37
2.2.3.3 Óleos integrais	38
2.2.4 Comparativo entre os Fluidos de Corte	38
2.2.5 Fluido de Corte e o Processo de Alargamento	40
2.2.5.1 Influência do fluido de corte sobre os esforços de usinagem	40
2.2.5.2 Influência do fluido de corte sobre o acabamento superficial	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	43
3.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS	44
3.2.1 Alargador Multicortante em Metal Duro	44
3.2.2 Alargador com Único Corte Ajustável em PCD	46
3.3 PARÂMETROS DE USINAGEM	47
3.3.1 Profundidade de Corte – Usinagem Piloto	47
3.3.2 Velocidade de Corte	49
3.3.3 Avanço	49
3.4 EQUIPAMENTO PARA AJUSTE DOS ALARGADORES	50
3.4.1 Equipamento de Regulagem da Aresta de Corte	50
3.4.2 Equipamento de Balanceamento	51
3.4.3 Microscópio Ótico	51
3.5 FLUIDOS DE CORTE UTILIZADOS	52
3.5.1 Método para Verificação da Concentração	52
3.5.2 Temperatura do Fluido	53
3.6 MATERIAL ENSAIADO	53
3.6.1 Composição e Propriedades Mecânicas	53
3.7 MÁQUINA-FERRAMENTA	54

3.8 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS	55
3.8.1 Máquina Tridimensional	55
3.8.2 Rugosímetro	56
3.9 METODOLOGIA EMPREGADA	56
3.9.1 Análise Estatística: ANOVA	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 RUGOSIDADE	59
4.1.1 Influência do Tipo do Alargador	60
4.1.2 Influência do Avanço	64
4.1.3 Influência do Tipo de Fluido de Corte	65
4.1.4 Influência do Concentração do Fluido de Corte	68
4.1.5 Interações Significativas às Rugosidades	69
4.2 DESVIOS DE FORMA	70
4.2.1 Influência do Tipo do Alargador	71
4.2.2 Influência do Avanço	72
4.2.3 Influência do Tipo de Fluido de Corte	73
4.2.4 Influência do Concentração do Fluido de Corte	74
4.2.5 Interações Significativas aos Desvios de Forma	75
4.3 MEDIDA DO DIÂMETRO	76
4.3.1 Influência do Tipo do Alargador	76
4.3.2 Influência do Avanço	77
4.3.3 Influência do Fluido de Corte e da Concentração do Fluido	78
4.3.4 Interações Significativas aos Desvios de Forma	78
5. CONCLUSÕES	79
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICES	84
ANEXO	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFNOR	-	Association Française de Normalisation
ANOVA		Analysis of Variance
ASME	-	The American Society of Mechanical Engineers
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
EP	-	Extrema Pressão
fig.	-	Figura
HSK	-	Hohl Shaft Kegel
ISO	-	International Standard Organisation
IT	-	ISO Tolerância
JIS	-	Japanese Industrial Standards
LSD	-	Least Significant Difference
MD	-	Metal Duro
PCBN	-	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
PCD	-	Diamante Policristalino

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	-	Ângulo de Cisalhamento
\varnothing	-	Diâmetro (mm)
χ	-	Ângulo de Direção ou Entrada (grau)
a_p	-	Profundidade de Corte (mm)
AlSi	-	Liga Alumínio-Silício
AlSiCu	-	Liga Alumínio-Silício-Cobre
e	-	Excentricidade
f	-	Direção de Avanço
F	-	Avanço (mm/rot)
f_z	-	Avanço por Aresta de Corte (mm/z)
h	-	Espessura de Usinagem (mm)
h'	-	Espessura do Cavaco (mm)
HRC	-	Dureza Rockwell C
KM	-	Afastamento Médio da Cratera
r	-	Raio de Ponta (mm)
R	-	Rugosidade Teórica (μm)
Ra	-	Média Aritmética da Rugosidade (μm)
Rt	-	Altura Máxima da Rugosidade (μm)
Rz	-	Média Aritmética das Alturas Máximas da Rugosidade em 5 regiões (μm)
TiAlN	-	Nitreto de Titânio Alumínio
TiN	-	Nitreto de Titânio
TiCN	-	Carbonitreto de Titânio
VB	-	Desgaste Frontal
Vc	-	Velocidade de Corte (m/min)
z	-	Número de arestas de corte

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DA GUIA DE VÁLVULA MONTADA EM UM MOTOR	1
FIGURA 2 - CINEMÁTICA DO PROCESSO DE ALARGAMENTO	4
FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS ALARGADORES	8
FIGURA 4 - ÂNGULOS DE HÉLICE (CORTE À DIREITA)	10
FIGURA 5 - GEOMETRIA DOS ALARGADORES (VISTA LATERAL E TOPO)	11
FIGURA 6 - COMPONENTE DOS ALARGADORES MONOCORTANTES	15
FIGURA 7 - DIÂMETROS DOS ALARGADORES COM ÚNICA ARESTA DE CORTE	15
FIGURA 8 - FOLGA ENTRE A LÂMINA E AS GUIAS	17
FIGURA 9 - FONTES DE CALOR E ZONAS DE CISALHAMENTO NA FORMAÇÃO DE CAVACO	27
FIGURA 10 - ZONAS DE ADERÊNCIA E ESCORREGAMENTO	29
FIGURA 11 - FORMAS DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE	30
FIGURA 12 - CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	33
FIGURA 13 - MOLÉCULA DE ÓLEO (MISCELA)	35
FIGURA 14 - TEMPERATURAS DE ATIVAÇÃO DOS ADITIVOS ANTIDESGASTE	37
FIGURA 15 - CORPO DE PROVA MONTADO	43
FIGURA 16 - ESQUEMA DE MONTAGEM DAS GUIAS DE VÁLVULAS	44
FIGURA 17 - ALARGADOR CONVENCIONAL EM METAL DURO	45
FIGURA 18 - ALARGADOR COM ÚNICA ARESTA DE CORTE	47
FIGURA 19 - ESQUEMA DO FURO PILOTO (CORTE LONGITUDINAL).....	48
FIGURA 20 - ALARGADOR DO FURO PILOTO	48
FIGURA 21 - FOTO (a) MOSTRA DETALHE DA REGULAGEM; E (b), VISÃO GERAL DO EQUIPAMENTO DE <i>PRE-SET</i>	51
FIGURA 22 - ESQUEMA DOS EIXOS DA MÁQUINA-FERRAMENTA	55
FIGURA 23 - TABELAS DO PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	57
FIGURA 24 - ALARGADOR MULTICORTANTE EM METAL DURO (a), E ALARGADOR MONOCORTANTE EM PCD (b)	61
FIGURA 25 - SUPERFÍCIE DE SAÍDA DO ALARGADOR EM METAL DURO (a)	

DO ALARGADOR EM PCD (b).....	62
FIGURA 26 - RESULTADOS E PERFIS DE RUGOSIDADE DO ALARGADOR MULTICORTANTE (a), E DO ALARGADOR MONOCORTANTE (b)..	63
FIGURA 27 - GRÁFICOS DAS INTERAÇÕES ENTRE O TIPO DE ALARGADOR E AVANÇO (a,b,c), E TIPO DE FLUIDO DE CORTE E AVANÇO (d) PARA AS RUGOSIDADES	70
FIGURA 28 - GRÁFICOS DAS INTERAÇÕES ENTRE O TIPO DE ALARGADOR E AVANÇO (a); TIPO DE ALARGADOR E FLUIDO DE CORTE (b) – CILINDRICIDADE; E FLUIDO DE CORTE E O AVANÇO (c) – CIRCULARIDADE	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS NO PROCESSO DE ALARGAMENTO	21
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL DA GUIA DE VÁLVULA	54
TABELA 3 - TABELA DA ANOVA PARA AS RUGOSIDADES	59
TABELA 4 - TABELA DA ANOVA PARA OS DESVIOS DE FORMA	70
TABELA 5 - TABELA DA ANOVA PARA A VARIAÇÃO DO DIÂMETRO	76

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - MÉDIAS DE R_a (μm) DOS ALARGADORES	60
GRÁFICO 2 - MÉDIAS DE R_z (μm) DOS ALARGADORES	60
GRÁFICO 3 - MÉDIAS DE R_t (μm) DOS ALARGADORES	61
GRÁFICO 4 - MÉDIAS DE R_a (μm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO	64
GRÁFICO 5 - MÉDIAS DE R_z (μm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO	64
GRÁFICO 6 - MÉDIAS DE R_t (μm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO	65
GRÁFICO 7 - MÉDIAS DE R_a (μm) DOS FLUIDOS DE CORTE	65
GRÁFICO 8 - MÉDIAS DE R_z (μm) DOS FLUIDOS DE CORTE	66
GRÁFICO 9 - MÉDIAS DE R_t (μm) DOS FLUIDOS DE CORTE	66
GRÁFICO 10 - MÉDIAS DE R_a (μm) PARA O TIPO DE ALARGADOR E OS FLUIDOS DE CORTE	67
GRÁFICO 11 - MÉDIAS DE R_z (μm) PARA O TIPO DE ALARGADOR E OS FLUIDOS DE CORTE	67
GRÁFICO 12 - MÉDIAS DE R_t (μm) PARA O TIPO DE ALARGADOR E OS FLUIDOS DE CORTE	67
GRÁFICO 13 - MÉDIAS DE R_a (μm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	68
GRÁFICO 14 - MÉDIAS DE R_z E R_t (μm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	68
GRÁFICO 15 - MÉDIAS DE R_a (μm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO PARA CADA FLUIDO DE CORTE	69
GRÁFICO 16 - MÉDIAS DE CIRCULARIDADE (mm) DOS ALARGADORES	72
GRÁFICO 17 - MÉDIAS DE CILINDRICIDADE (mm) DOS ALARGADORES	72
GRÁFICO 18 - MÉDIAS DA CIRCULARIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO	73
GRÁFICO 19 - MÉDIAS DA CILINDRICIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO	73
GRÁFICO 20 - MÉDIAS DA CILINDRICIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	74

GRÁFICO 21 - MÉDIAS DA CIRCULARIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	74
GRÁFICO 22 - MÉDIAS DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS (mm) EM RELAÇÃO AOS ALARGADORES	76
GRÁFICO 23 - VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS (mm) EM RELAÇÃO AO AVANÇO E AO TIPO DE ALARGADOR	77

RESUMO

As guias de válvulas têm fundamental importância no desempenho dos motores de combustão interna. O mal acabamento do diâmetro interno deste componente pode acarretar o excessivo ruído e consumo de óleo. A garantia da qualidade dos furos das guias de válvulas pode ser alcançada com o processo de alargamento com o adequado uso de fluido de corte. O objetivo deste trabalho foi investigar a influência do tipo de alargador, avanço, fluido de corte e a concentração de óleo do fluido na obtenção de guias de válvulas com qualidade. O estudo comparativo entre alargadores monocortantes com lâmina em diamante e alargadores multicortantes em metal duro, utilizando dois fluidos de corte semi-sintéticos é apresentado. A qualidade dos furos alargados foi quantificada pelos desvios de circularidade e cilindridade, precisão do diâmetro gerado em relação a ferramenta e pelas rugosidades (R_a , R_z e R_t) da superfície usinada. Os resultados obtidos permitem identificar a influência significativa do tipo de alargador sobre os desvios de forma, bem como a influência da variação do avanço para a cilindridade quando comparadas às demais variáveis independentes. No tocante à rugosidade, observou-se a influência do avanço, tipo de alargador e tipo de fluido de corte. A variação da concentração dos fluidos de corte não apresentou resultados com significância estatística.

Palavras-chave: alargadores; fluido de corte; concentração do fluido; avanço.

ABSTRACT

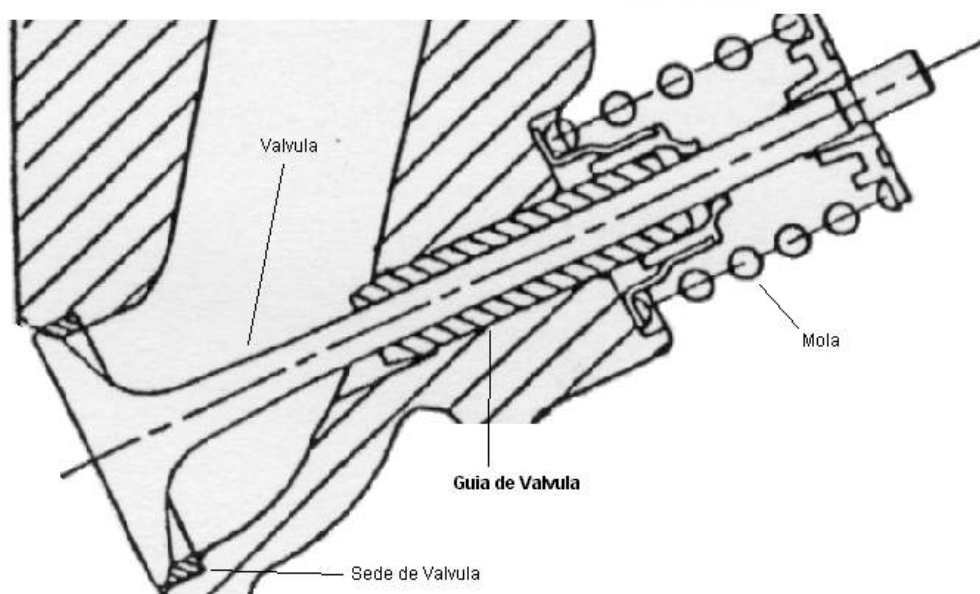
The valve guides are of fundamental importance in the performance of internal combustion engines. The poor finishing of the internal diameter of this component can result in excessive noise and oil consumption. The quality assurance of the valve guides holes can be reached with the reaming process with adequate use of the cutting fluid. The aim of this work was to investigate the influence of the type of reamer, feed rate, cutting fluid and oil concentration of the fluid when obtaining valve guides with quality. The comparative study between diamond single blade reamer and solid carbide reamer, using two semi-synthetic cutting fluids is presented. The quality of the reamed holes is quantified by the circularity and cylindricity deviation, diameter precision generated related to the tool and the roughness of the machined surface (R_a , R_z and R_t). The results obtained allow identifying the significant influence in the type of the reamer against the form deviation, as well as the influence of the feed rate in the cylindricity when compared to the remaining independent variables. Regarding the roughness, influence in the feed, type of reamer and type of cutting fluid was observed. The variation in the fluid concentration did not show results with statistical significance.

Keywords: reamer; cutting fluid; fluid concentration; feed.

1 INTRODUÇÃO

As guias de válvulas desempenham um papel importante na fabricação de motores de combustão. Primeiramente, elas têm a função de proteger o cabeçote, geralmente feito em liga de alumínio ou ferro fundido, do desgaste excessivo promovido pelo contato com as hastes das válvulas. Além disso, elas também propiciam condições geométricas para o alinhamento e a mancalização da haste das válvulas, garantindo um deslizamento com baixo atrito, o que contribui para a redução de ruídos, consumo de óleo e a manutenção das condições de vedação entre a cabeça e a sede das válvulas. Na fig. 1 é possível visualizar o esquema da válvula montada em um cabeçote de um motor de combustão interna.

FIGURA 1 – ESQUEMA DA GUIA DE VÁLVULA MONTADA EM UM MOTOR



Em motores de baixa cilindrada, as guias de válvula são fabricadas a partir de buchas de aço sinterizado ou latão de alta resistência extrudado na forma de tubos. As guias são prensadas nos alojamentos previamente usinados no cabeçote e finalmente passam pelo processo de usinagem por alargamento para a obtenção de furos com estreitas tolerâncias dimensionais e de forma, como também para garantir um perfil de rugosidade adequado ao seu funcionamento.

Tolerâncias dimensionais IT 7 ou inferiores e desvios de forma menores que 0,008 mm são condições necessárias para tais componentes. O perfil de rugosidade deve ser bem controlado, não devendo ser, necessariamente, os menores valores de altura pico-vale, mas sim apresentar a distribuição e manutenção de um filme lubrificante para redução do atrito com a haste da válvula.

Nos últimos anos tem se observado uma tendência, em alguns sistemas produtivos, no tocante ao tipo de máquinas-ferramenta empregada no processo de alargamento. As máquinas dedicadas, tais como as furadeiras multifusos das linhas *transfer*, vêm dando lugar aos centros de usinagem monofusos de elevada flexibilidade.

Entretanto, por ser uma operação de acabamento com baixos valores de avanço por dente (f_z) e exigir uma ferramenta dedicada, o processo de alargamento pode-se tornar um gargalo de produção quando da utilização de centros de usinagem monofusos. Para contornar tal problema, a indústria automobilística e seus fornecedores vêm pesquisando novas alternativas, que além de garantirem a qualidade dos furos alargados, possam implicar em aumento da produção. Dentre tais alternativas, pode-se destacar as novas gerações de máquinas-ferramenta com elevadas rotações – maiores velocidades de corte e avanço; novos materiais e geometrias de alargadores para suportarem esses aumentos de velocidade e novos tipos de fluidos de corte, mais eficientes e, ao mesmo tempo, menos poluentes.

O processo de alargamento é fortemente influenciado pela adequada aplicação de fluido de corte, o que traz benefícios sobre a vida das ferramentas, produtividade, acabamento superficial e geométrico do furo e tem efeito sobre a espessura da camada endurecida após a usinagem (Belluco 2002).

Diante desse cenário, e a partir do acompanhamento do processo de alargamento de guias de válvulas no chão de fábrica de uma indústria automobilística, justifica-se a realização deste trabalho, pois o estudo e conhecimento da influência das condições de usinagem sobre a qualidade dos furos alargados é de grande interesse tanto para indústria como para o meio acadêmico. Essa qualidade será avaliada pela medição dos desvios de forma, circularidade e cilindridade, e da rugosidade da superfície, quantificada pelos parâmetros R_a , R_z e R_t .

1.1 OBJETIVOS

Os ensaios realizados objetivam comparar o alargador monocortante em PCD com o alargador multicortante em metal duro na usinagem de guias de válvulas. Desta forma, variou-se o avanço por aresta de corte e a concentração de dois tipos de emulsões semi-sintéticas, visando analisar a rugosidade da superfície, os desvios de forma, a variação do diâmetro dos furos e a redução do tempo de usinagem.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, são analisados os tipos de alargadores, sendo dado ênfase aos alargadores paralelos de acabamento convencionais e com aresta única de corte. É descrita a geometria e os parâmetros do processo de alargamento (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte). Neste capítulo também são analisados os fluidos de corte, sua classificação e características necessárias ao processo de alargamento. Comenta-se sobre a tribologia da interface cavaco-ferramenta e as regiões onde o fluido de corte atua.

O capítulo 3 mostra toda metodologia e planejamento utilizado para a preparação e execução dos ensaios, bem como as variáveis de processo, tais como: fluidos de corte, geometria das ferramentas utilizadas e parâmetros de corte. Também é apresentada a metodologia utilizada nos experimentos.

Os resultados e discussões são apresentados no capítulo 4, restando para o capítulo 5 a conclusão e propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

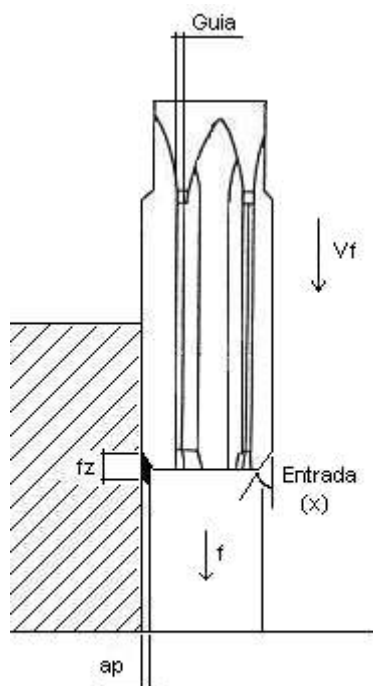
2.1 ALARGAMENTO

2.1.1 Processo de Alargamento

O alargamento é definido como um tipo de furação utilizando uma ferramenta que produz cavacos com pequenas dimensões e proporciona superfícies com alta qualidade superficial e precisão dimensional e de forma (Weinert et al 1998). O alargamento é uma tecnologia que utiliza ferramenta de corte com geometria definida.

Os alargadores são geralmente de forma cilíndrica ou cônica, que por meio de movimento rotativo de corte e de avanço axial usinam os furos deixando-os mais precisos. Os alargadores convencionais (com múltipla arestas de corte) apresentam arestas paralelas, com hélice à direita ou à esquerda, e também de forma helicoidal (Ferraresi 1975). Na fig. 2 é possível visualizar a cinemática do processo de corte.

FIGURA 2 – CINEMÁTICA DO PROCESSO DE ALARGAMENTO



Alargador multicortante com 6 dentes e ângulo de hélice neutro.

Legenda:

χ – ângulo de entrada ou direção;

fz – avanço por aresta de corte;

f – direção do avanço;

Vf – velocidade de avanço;

ap – profundidade de corte;

Vc – velocidade de corte.

Segundo Kress (1974), os alargadores se diferem em monocortante e multicortante, sendo que o número das múltiplas arestas de corte são normalmente par e os dentes não são simétricos em algumas posições, evitando vibrações. Kress comenta que a precisão do furo alargado depende muito do alargador, sendo que a tolerância de construção recomendada do diâmetro do alargador deve ser 35% menor que a tolerância do furo desejado.

Os alargadores monocortantes executam furos com alta qualidade, e permitem utilizar maiores velocidades de corte (Schroeter 1989). A utilização de alargadores multicortantes pode se tornar interessante, visto que com um maior número de dentes há a possibilidade da utilização de uma maior velocidade avanço. Existe também a dificuldade em regular as ferramentas de aresta única de corte (monocortantes), além da manutenção dos componentes de fixação e regulagem.

A usinagem é dividida no corte pelas arestas principais e alisamento nas arestas laterais ou régua de guias, na qual guiam a ferramenta se apoiando na superfície do furo. Os alargadores monocortantes têm a vantagem de separar as funções de corte e guia em elementos de trabalho diferentes (guia ou sapata e lâmina de corte). Desta forma, há a possibilidade de ajuste de diâmetro e troca do consumível (lâmina).

As ferramentas multicortantes apresentam aresta de corte e guia no mesmo corpo e encontram-se simultaneamente em contato com a peça durante a usinagem (Schroeter 1989, Kress 1974 e Weinert et al 1998).

A precisão e acabamento do furo alargado dependem da fixação da peça, rigidez da máquina-ferramenta, parâmetros de corte, aplicação de fluido de corte e principalmente da condição do pré-furo – processo de alargamento necessita de um furo pré-existente. Segundo Lugscheider et al (1997), a condição inicial do pré-furo a ser alargado, tais como a cilindricidade, retilidade e regularidade da superfície são de fundamental importância para o acabamento, pois os alargadores tendem a acompanhar a linha de centro do pré-furo.

Segundo Weinert et al (1998), o primeiro contato da ferramenta com o pré-furo deve ser igual entre todas as arestas de corte. Porém, devido ao desalinhamento do eixo da ferramenta de pré-furação, erro de batimento do alargador, irregularidades na aresta de corte, desvios de forma no pré-furo, problemas na fixação do alargador no fuso da máquina-ferramenta, levam ao corte

não simultâneo e não regular. Kress (1974) encontrou piores resultados no desvio de cilindridade em furos desalinhados, e recomenda um erro de alinhamento entre o pré-furo e o alargador menor que 0,020 mm. Ferraresi (1975), também comenta que os desvios de posicionamento do pré-furo, não podem ser corrigidos com alargadores de acabamento.

O alargamento é empregado na usinagem de diferentes peças. Além de usinar válvulas hidráulicas e componentes da indústria aeronáutica, este processo é muito utilizado na fabricação de motores de combustão interna:

- Cabeçote: linha da árvore de comando, tucho hidráulico, guia de válvula e seu alojamento, alojamento da vela de ignição;
- Bloco: linha da árvore do virabrequim;
- Biela e bomba de óleo;
- Carcaça de Transmissão;
- Cilindro de freio e braço da suspensão

2.1.2 Comparação do Alargamento com Outros Processos para o Acabamento de Furos

Para o acabamento de furos precisos, além do alargamento podem ser utilizados outros processos de geometria definida como torneamento interno e mandrilamento fino, e processos com geometria não definida, como brunimento e retificação interna. Para o torneamento interno, brunimento e retificação interna, há a necessidade de utilização de máquinas especiais. Já no mandrilamento fino, as ferramentas não apresentam elementos de guia, restringindo as profundidades de usinagem a duas ou três vezes o diâmetro do furo a ser executado; além de dificilmente permitir a usinagem de diâmetros menores que 10 mm, e garantir tolerâncias IT 7 (Agarico 2002). Porém, o processo de furação profunda (profundidade até 300 vezes o diâmetro) atinge tolerâncias IT 7 executando a furação em cheio, isto é, não necessita de processo posterior. Entretanto, é necessário utilizar máquinas especiais para a aplicação do fluido de corte e lunetas guia (Kress 1974).

Weinert et al (1998) comentam que com brocas helicoidais convencionais é possível alcançar tolerâncias de diâmetro de até IT 11, e IT 8 (brocas de metal duro).

Se houver necessidade de uma tolerância menor é preciso utilizar outro processo para o acabamento. No mesmo pensamento, Lugscheider et al (1997), dizem que bons acabamentos superficiais e geométricos não são encontrados na furação convencional, devido à geração de duplo cavaco e os mesmos terem que ser transportados por meio de canais, o que aumenta os esforços de corte.

Kress (1974), explica que no mandrilamento de precisão a exatidão de um furo depende quase exclusivamente da máquina. Com relação à posição de um furo, precisão dimensional e acabamento superficial, o mandrilamento de precisão demonstra bons resultados em relação ao alargamento e a furação profunda, porém com mandriladoras de alto custo (e temperatura ambiente controlada). Esta idéia também pode ser considerada para a retificação interna e o brunimento. Desta forma, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros com grande comprimento, que necessitem uma qualidade IT 7, a serem executados em uma máquina *transfer*, o alargamento se torna viável.

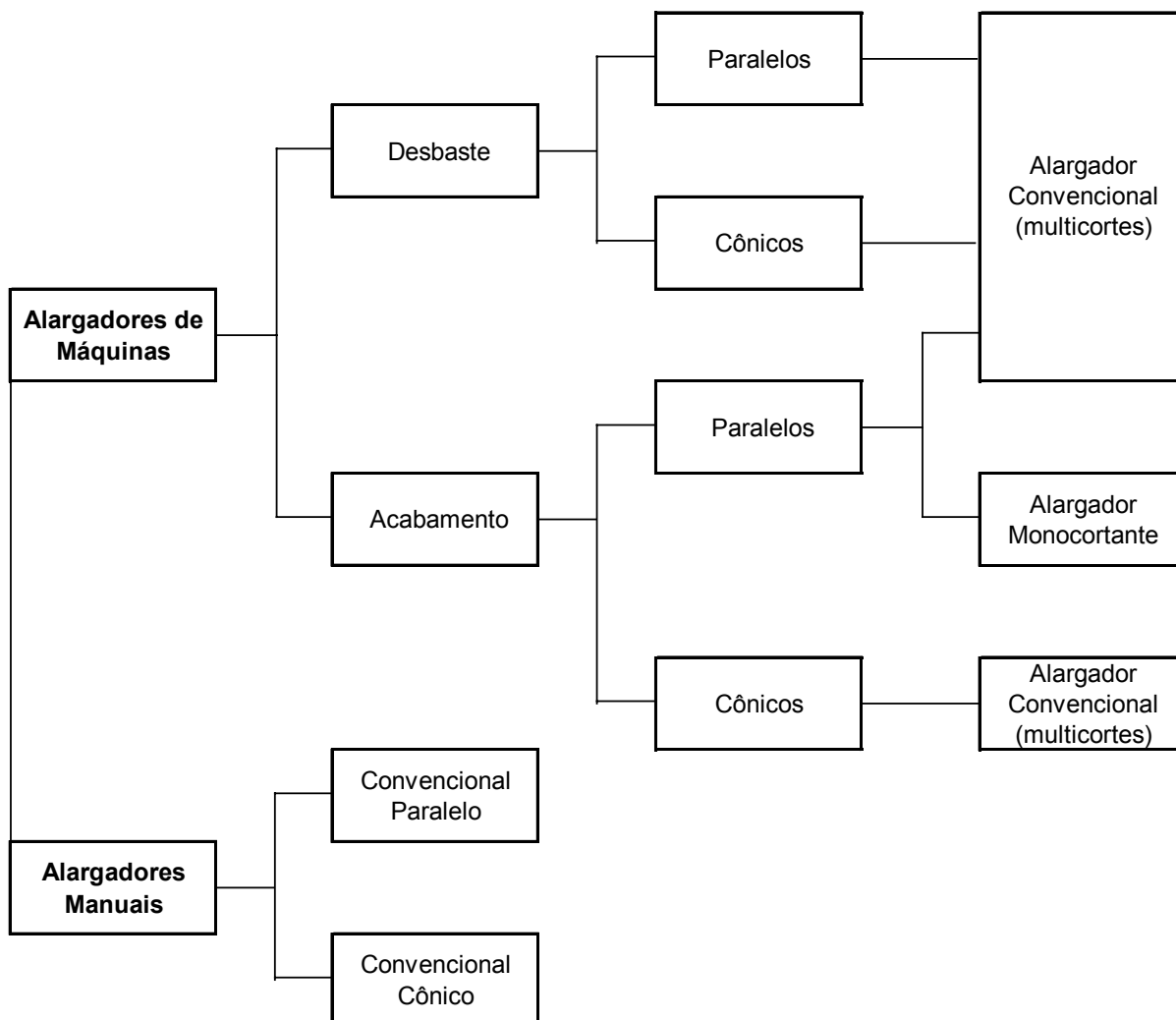
Além das máquinas *transfer*, Kress mostrou exemplos do processo de alargamento executado em tornos e furadeiras radiais. Schroeter (1989), também utilizou uma furadeira radial para realizar seus experimentos. Eckhardt (1993) realizou seus ensaios em um centro de usinagem, o que demonstra a facilidade e versatilidade do processo de alargamento.

2.1.3 Geometria dos Alargadores

A terminologia utilizada para os alargadores foi bem discutida em Stemmer (1995), Ferraresi (1975) e Schroeter (1989). Os alargadores distinguem-se entre de desbaste e de acabamento. Os alargadores de desbaste são utilizados como preparação para os alargadores de acabamento, garantindo melhores condições que os pré-furos brutos (fundidos ou forjados) e os executados por brocas helicoidais. De maneira geral, os alargadores são compostos por uma haste que pode ser cilíndrica ou cônica, e segundo catálogos de fabricantes, os mesmos podem ser fixos em mandris por parafusos laterais (tipo *Weldon*), em mandris hidráulicos, por interferência térmica ou diretamente em adaptadores (ex. HSK). Os alargadores podem gerar furos paralelos ou cônicos, e podem ser utilizados em

máquinas ou manualmente. Na fig. 3 é mostrado um esquema da classificação dos alargadores. No apêndice 1 podem ser vistos fotos de alguns alargadores.

FIGURA 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS ALARGADORES



2.1.3.1 Aresta secundária de corte - guia

Os alargadores de múltiplas arestas de corte (tradicionais) apresentam em sua aresta secundária de corte uma guia cilíndrica (Eckhardt 1993). Nos alargadores com única aresta de corte, os elementos de corte e de guia se encontram separados, e a lâmina é intercambiável (Bezerra et al 2002, Weinert et al 1998, Eckhardt 1993, Weingaertner e Schroeter 2000 e Lugscheider et al 1997). A variação do tamanho das guias tem efeito sobre a precisão dimensional e acabamento superficial da peça. Bezerra et al (2002) relatam, em alargadores

multicortantes, que com guias menores a rugosidade e cilindridade dos furos alargados se reduz. As guias mais largas pioram a qualidade do furo devido a maiores forças de atrito. Kress (1974), também verificou que com guias mais estreitas em ferramentas com múltiplas arestas de corte, o acabamento superficial foi melhor, sem prejudicar o posicionamento do furo (uma das principais funções da guia). Kress (1974), explica que para a melhor lubrificação da aresta secundária (ou guia), melhorando o acabamento superficial, deve-se inserir um chanfro nesta aresta. Assim, a piora de cilindridade encontrada por Bezerra et al (2002) com o aumento da largura das guias é devida ao atrito excessivo.

As guias mais largas também aumentam a tensão residual compressiva no furo alargado, devido ao alisamento das paredes. Porém, Kress (1974), demonstra que para alargadores monocortantes, a largura das guias não tem relação com a piora na qualidade superficial do furo; entretanto com o aumento desta largura o desvio de circularidade diminui no furo alargado com este tipo de ferramenta, pois ocorre o melhor direcionamento da ferramenta no furo.

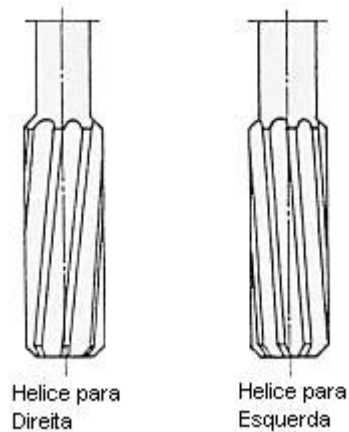
Nos estudos realizados sobre o alargamento de materiais endurecidos, Kress (2001), observou que as réguas de guias tendem a apoiar a ferramenta com única aresta de corte durante a usinagem, devido à sustentação oposta à força radial exercida durante o corte, evitando os desvios de diâmetros ou conicidade do furo alargado.

2.1.3.2 Ângulo de hélice

Nas ferramentas com múltiplas arestas de corte, os canais (entre dentes) podem estar dispostos a zero grau ou helicoidais à direita ou à esquerda (ângulos positivos e negativos respectivamente). O alargamento de furos com interrupções têm melhores resultados com ferramentas com canais helicoidais. O corte à direita (fig. 4), mais usual, é verificado olhando o alargador de topo e a aresta inferior, o corte vai da esquerda para a direita (anti-horário). A hélice à direita é identificada visualizando o alargador de topo, e o canal se desenvolve para a direita. A hélice à esquerda empurra o cavaco para frente, o que evita a degradação da superfície já usinada, e a ferramenta contra a fixação, eliminando folgas. Desta forma, a hélice à direita é somente utilizada na usinagem de furos cegos. Na fig. 4 também é possível

analisar as hélices dos alargadores. Para trabalhos de precisão os alargadores de canais retos são preferíveis. (Schroeter 1989 e Stemmer 1995).

FIGURA 4 – ÂNGULOS DE HÉLICES (CORTE À DIREITA)



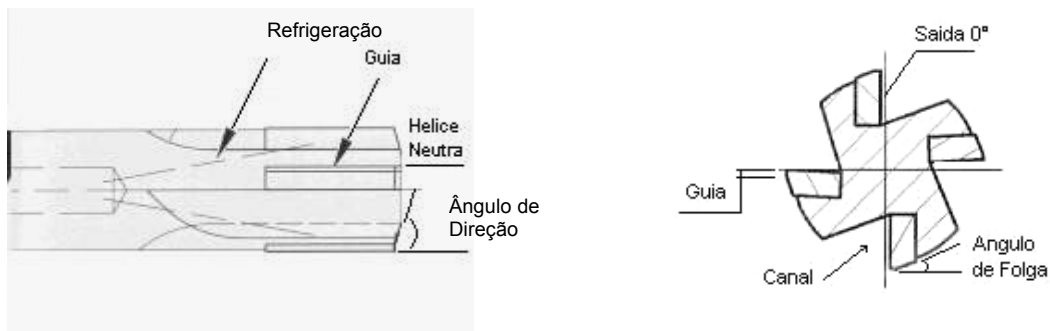
Bezerra et al (2002), também encontraram bons resultados de circularidade e cilindridade no alargamento de alumínio com ferramentas de zero e sete graus de ângulo de hélice (ou ângulo de saída lateral). A melhor rugosidade da superfície foi encontrado para ferramentas positivas ou negativas (não neutras), isto devido ao maior comprimento da aresta secundária de corte (guias), que alisam as paredes dos furos. As ferramentas mais negativas (acima de -10°), apresentaram partículas esmagadas aderidas na parede do furo.

2.1.3.3 Ângulo de entrada

De acordo com Kress (1974), o aumento do ângulo de entrada, ou de direção (χ), melhora a relação entre espessura e largura do cavaco gerado, que reduz a vibração. Porém, o ângulo muito grande piora o acabamento superficial em ferramentas monocortantes, pois a espessura do cavaco aumenta, pois há somente uma aresta de corte. Eckhardt (1993) mostra ferramentas com mais de um ângulo de direção, sendo que o primeiro ângulo, analisando do topo da ferramenta, é responsável pela remoção do excesso de material, e o segundo ângulo realiza o corte de acabamento do furo. Os ângulos de direção muito pequenos podem causar

o travamento da ferramenta. Desta forma, a escolha do ângulo de entrada deve levar em conta a profundidade de corte e a rugosidade esperada. Na fig. 5 é possível verificar a geometria dos alargadores.

FIGURA 5 – GEOMETRIA DOS ALARGADORES (VISTA LATERAL E TOPO)



Ferraresi (1975) apresenta a existência de uma conicidade na aresta lateral do corte, na direção da haste (parte cilíndrica do alargador que alisa o furo), que evita o engripamento e a vibração da ferramenta e melhora o acabamento do furo. Esta conicidade estaria entre 0,005 e 0,020 mm, para alargadores convencionais. Em Schroeter (1989) e Eckhardt (1993), para alargadores com única aresta de corte, esta conicidade deve estar entre 0,008 e 0,010 mm para cada 10 mm de comprimento de aresta. Em Beck (1996) e Mapal (2003) é recomendado, para ferramenta monocortante, inclinações de 0,010 a 0,015 mm para cada 10 mm de aresta. Kress (1974), também recomenda utilizar uma conicidade de 0,010 mm para cada 10 mm de aresta de corte, para alargadores com única aresta de corte. Schroeter 1989 e o fabricante Hanna (2003) mostram que com o aumento da conicidade da aresta de corte maior é a rugosidade do furo.

2.1.3.4 Ângulo de saída

O ângulo de saída depende do material a ser usinado, sendo que materiais mais duros e frágeis (cavacos curtos) utilizam ângulos negativos ou neutros. Os materiais macios e dúcteis utilizam ângulos positivos (cavacos longos).

Em suas pesquisas, Schroeter (1989) e Eckhardt (1993) detectaram que na usinagem de alumínio os ângulos de saída positivo tiveram menores valores de

sobremedida do diâmetro dos furos. A sobremedida do diâmetro é a diferença entre o diâmetro do furo alargado e o diâmetro de ajuste da ferramenta.

É recomendado (Beck 1996) à utilização de ângulo de saída neutro para materiais de cavaco curto como ferros fundidos GG e GGG e latão, ângulo positivo de seis graus para aço e cromo, e quinze graus para alumínio e materiais macios.

2.1.4 Materiais dos Alargadores

As ferramentas de alargar trabalham com pequenas espessuras de usinagem, necessitando boa afiação das arestas de corte. Assim, o material da ferramenta deve ter grande resistência ao desgaste, pois as solicitações térmicas e mecânicas se situam em uma pequena área da aresta de corte, devido ao seu pequeno raio. Este nível de afiação impede a utilização das cerâmicas (Eckhardt 1993).

Os materiais amplamente utilizados na fabricação dos alargadores são os metais duros, cermet, nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) e o diamante policristalino (PCD); este último somente utilizado em materiais não-ferrosos.

É usual a utilização de ferramentas de metal duro com revestimento de nitreto de titânio (TiN) na usinagem de aços e ferros fundidos, nitreto de alumínio titânio (TiAlN) na usinagem de ferro fundido nodular e aços inoxidáveis, e utilização de carbonitreto de titânio (TiCN) para a usinagem de aços e liga de alumínio. Estes revestimentos aumentam a dureza e reduzem o coeficiente de atrito na superfície da ferramenta, possibilitando a utilização de maiores velocidades de corte e evitando a formação de aresta postiça de corte (Hanna 2003).

A classe *K* de metal duro é uma das mais utilizadas nos alargadores, sendo mais comum às classes K01 ou K05 na fabricação de lâminas ou guias (metal duro polido) das ferramentas com única aresta de corte. A utilização destas classe de metal duro como aresta de corte podem ocasionar lascamento das mesmas devido a baixa tenacidade. Desta maneira, pode-se aumentar a tenacidade do material da ferramenta, sendo indicado a classe K10 (Eckhardt 1993 e Hanna).

Os cermets também são utilizados nos alargadores. Este material apresenta uma ou mais fases de cerâmicas e uma fase metálica como matriz. Durante a sinterização, a presença de carbonetos de titânio e outros óxidos inibem o

crescimento de grão, garantindo elevada dureza e maior tenacidade (Stemmer 1995). Segundo os catálogos dos fabricantes Hanna (2003), Mapal (2003) e Beck (1996), os cermetes podem trabalhar em velocidades de corte 50% superiores as utilizadas com o metal duro. As réguas de guia, para alargadores com única aresta de corte são usualmente fabricadas em cermet, apresentando maior resistência ao desgaste e menor aderência de material que o metal duro; além de resultar em melhor acabamento superficial e desvio de forma (Eckhardt 1993).

Em Kress (2001), são discutidas as vantagens das ferramentas em PCBN no alargamento de materiais endurecidos (tratados termicamente). O PCBN é um material sintético, quimicamente estável, de elevada dureza e grande capacidade refratária, que permite trabalhar com materiais de elevada dureza. Agarico (2002), não recomendou a utilização de PCBN na usinagem de um aço com grande variação de dureza - áreas endurecidas e macias. Entretanto, para o alargamento de uma peça em aço liga com dureza de 58 HRC (homogênea), o PCBN apresentou excelentes resultados de vida útil.

A utilização de diamante policristalino (PCD) no alargamento é normalmente em materiais não-ferrosos, devido a afinidade química dos materiais ferrosos. Contudo, é possível encontrar ferramentas com guias em PCD na usinagem de aços endurecidos. Isto devido as baixas temperaturas que as guias alcançam durante o alargamento, não havendo a difusão de carbono da ferramenta (Agarico 2002). O PCD é normalmente soldado em uma base de metal duro, diretamente na ferramenta ou em um inserto intercambiável. Estas ferramentas tem elevada dureza, resistência ao desgaste e capacidade refratária, além de permitir arestas de corte muito afiadas e com pequena tendência a aderência de material. Entretanto o PCD deve ser utilizado em máquinas-ferramentas rígidas, pois devido a vibração, pode ocorrer impactos na ferramenta que levaria ao lascamento.

A principal aplicação do diamante policristalino é a usinagem de precisão com baixas profundidades de corte e avanços, pois este material apresenta baixa resistência à flexão e grande fragilidade (Weingaertner e Schroeter 2000).

2.1.5 Alargadores Multicortantes

As ferramentas de alargar com múltiplas arestas de corte compreendem um único conjunto de dentes em contato com a peça durante a usinagem, com as arestas principais de corte e as arestas laterais. As últimas arestas citadas são responsáveis pelo alisamento do furo, nas quais apoiam-se contra a parede do furo. A aresta lateral ou secundária deve conter duas particularidades: ser afiada com um maior ângulo de folga, e ter uma superfície larga para guiar o alargador. Esta relação pode restringir e reduzir as velocidades de corte dos alargadores com várias arestas de corte (Weinert et al 1998).

Os alargadores com maior número de arestas de corte geram acabamentos superficiais melhores, pois os esforços de corte por aresta são diminuídos. Porém, a quantidade de arestas de corte dependem do material da peça, diâmetro e tipo de alargador, pois o escoamento de cavaco pelos canais de saída pode ser prejudicado (Ferraresi 1975). No artigo escrito por Bezerra et al (2001), é demonstrado que com o aumento do número de arestas de corte a precisão do diâmetro e o acabamento superficial do furo melhoram, pois há a redução do avanço por aresta de corte (para a mesma velocidade de avanço) e o aumento da quantidade de guias, o que aumenta o efeito de alisamento na parede dos furos. Este efeito neutraliza o aumento de vibrações gerados pelas múltiplas arestas de cortes, mesmo não sendo simétricas.

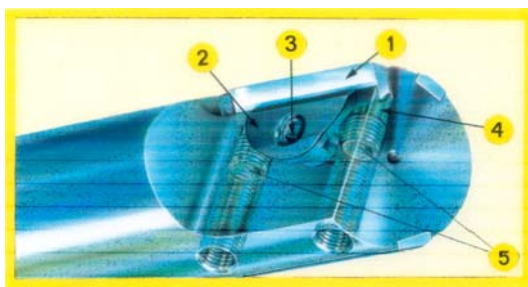
A construção dos alargadores multicortantes permite uma maior gama de diâmetros. O critério de fim de vida para este tipo de alargador é usualmente o aumento da rugosidade e a redução do diâmetro da peça. Entretanto, há um tipo de alargador especial que por meio de um parafuso no centro da ferramenta (entre as arestas de corte) permite a regulação do diâmetro. A reafiação destas ferramentas é possível, contudo resulta em uma diminuição do diâmetro - devido a conicidade das ferramentas (Kress 1974).

Os alargadores com múltiplas arestas de corte geralmente podem ser construídos em aço rápido, metal duro (com ou sem revestimento), ou terem lâminas de PCBN, cermet e PCD soldadas ao corpo de metal duro (Pain 2002).

2.1.6 Alargadores com Única Aresta de Corte Regulável

O diferencial entre os alargadores com única aresta de corte, como já comentado, é a separação dos elementos de corte e de guia. Este tipo de alargador normalmente apresenta lâminas ou insertos intercambiáveis e têm ângulo de folga positivo (Kress 1974). A regulagem e fixação das lâminas de corte podem ser encontradas em vários catálogos (Hanna 2003, Beck 1996, Seco 2002 e Mapal 2003). A lâmina é fixada no alojamento por meio de um grampo que é preso por um parafuso. O ajuste da lâmina é realizado por dois parafusos que empurram suas respectivas cunhas; e o diâmetro da ferramenta é a distância entre a lâmina e as guias. Na fig. 6 é demonstrado a montagem do alargador monocortante com lâmina intercambiável.

FIGURA 6 – COMPONENTES DOS ALARGADORES MONOCORTANTES



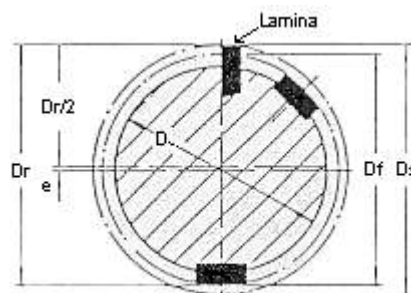
Legenda:

- 1 – lâmina de corte;
- 2 – grampo;
- 3 – parafuso de fixação do grampo;
- 4 – cunhas de ajuste;
- 5 – parafusos de ajuste.

FONTE: PAIN, J. Réglage outil à patins de guidage, 2002.

O diâmetro do furo gerado é maior que o valor de regulagem da ferramenta, pois o diâmetro formado pelas guias é menor e não coincide com o diâmetro do alargador, gerando uma excentricidade (fig. 7).

FIGURA 7 - DIÂMETROS DOS ALARGADORES COM ÚNICA ARESTA DE CORTE



FONTE: KRESS, D. El escariador con altas velocidades de corte, 1974.

$D_r = \varnothing$ do alargador

$D = \varnothing$ do corpo da ferramenta

$D_s = \varnothing$ de corte

e = excentricidade

$D_f = \varnothing$ das guias

Ao entrar em um furo, devido às forças de corte, a ferramenta se ajusta a uma posição em que a aresta de corte e a guia oposta fazem contato com as paredes do furo. Na equação 4 é demonstrada esta excentricidade. As guias destes alargadores são normalmente chanfradas para melhorar a entrada da lubrificação e formar um filme lubrificante (Kress 1974).

$$e = (D_s / 2) - 1/2[(D_s / 2) + (D_f / 2)] \quad (1)$$

com;

$$D_s / 2 = D_r - (D_f / 2) \quad (2)$$

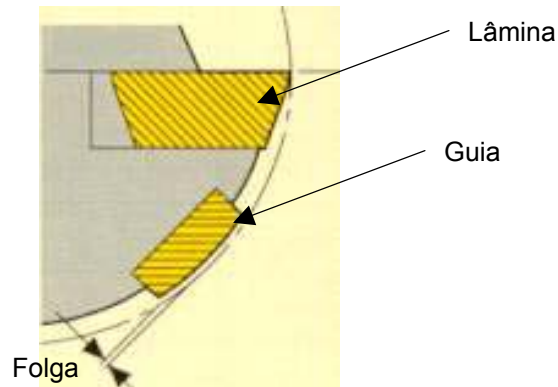
substituindo (2) em (1):

$$e = D_r - (D_f / 2) - 1/2[(D_r - (D_f / 2) + (D_f / 2)] \quad (3)$$

$$e = (D_r - D_f) / 2 \quad (4)$$

É recomendada (Seco 2002) uma folga entre as guias e lâmina do alargador de 0,015 mm para diâmetros menores e iguais a 10 mm e 0,020 mm para as ferramentas com diâmetros maiores que 10 mm. Beck (1996) recomenda uma folga de 0,020 mm para alargadores com diâmetro acima de 10 mm; entretanto Mapal (2001) aceita um valor de folga de 0,004 a 0,008 mm para alargadores menores que 7 mm de diâmetro. Segundo Weinert et al (1998) se há uma grande distância entre a lâmina em relação às guias, podem aparecer oscilações durante a usinagem, pois as guias não entram em contato continuamente com a parede do furo, não guiando e alisando o mesmo. É possível visualizar a folga entre a guia e a lâmina de um alargador monocortate na fig. 8.

FIGURA 8 – FOLGA ENTRE A LÂMINA E AS GUIAS



FONTE: SECO. Furação e alargamento – guia técnico, 2002.

As guias estão distribuídas radialmente e suportam as forças de usinagem, e conduzem rigidamente a ferramenta, o que possibilita a usinagem de furos longos e com pequenos diâmetros (Hanna 2003). Na usinagem de materiais endurecidos, Kress (2001), explica a dificuldade das forças radiais que conduz a desvios de diâmetros. As réguas de guias tendem a absorver estes desvios. Para a melhor vida útil dos insertos na usinagem de materiais endurecidos, é usual inserir uma pré-lâmina à frente e com menor diâmetro da lâmina principal. Isto garante uma profundidade de corte uniforme, que possibilita o aumento do avanço e velocidade de corte.

Normalmente as réguas de guias são de metal duro, cermet, PCBN ou PCD. Segundo Weinert et al (1998), o metal duro é inadequado para a usinagem com mínima quantidade de lubrificação, pois ocorre a aderência de material da peça às guias. Desta forma, o PCD se torna interessante para a boa usinagem. Agarico (2002) mostra ensaios com a utilização de alargadores com guias de PCD para a usinagem de materiais ferrosos. A difusão do carbono não ocorre devido às baixas temperaturas em que as guias trabalham (utilizando fluido de corte).

As principais vantagens dos alargadores com única aresta de corte sobre os alargadores convencionais pode ser descrita pela intercambiabilidade da lâmina, e possibilidade de ajuste do diâmetro, compensando o desgaste. Nos ensaios comparativos de Kress (1974), foram encontrados para os alargadores de única aresta de corte, menores valores de defeito de cilindridade e rugosidade da superfície, e valores iguais de precisão do diâmetro em comparação a um alargador convencional.

Este tipo de ferramenta, segundo Kress (1974) e Elliott (2003), exige a utilização de fluido de corte, sendo que a usinagem a seco produz o desgaste excessivo das guias. Além disso, Weinert et al (1998), comentam sobre a utilização da mínima quantidade de lubrificação na zona de corte, onde foram encontrados desvios superiores à tolerância IT 8 em uma liga $AlSi_9Cu_3$. Para reduzir a aderência do material da peça nas réguas de guias da ferramenta, com a aplicação da mínima quantidade de lubrificação, as mesmas são confeccionadas em PCD. Entretanto, Weinert et al (1998) nestes ensaios verificou a formação de aresta postiça de corte nas lâminas de PCD e metal duro. Desta forma, a utilização de fluido de corte é essencial para furos com maiores qualidades.

2.1.7 Parâmetros de Corte para o Alargamento

Os parâmetros para a usinagem garantem a boa qualidade superficial e geométrica de uma peça, e como consequência a viabilidade econômica da utilização de um alargador (Eckhardt 1993). Nos catálogos de fabricantes em geral, os dados de corte preconizados são valores médios e orientativos, variando conforme cada aplicação específica. As principais parâmetros para a escolha do alargador são: material e geometria da peça; tipo de máquina; tipo de fixação da peça e da ferramenta; e acabamento e tolerâncias desejados.

2.1.7.1 Velocidade de corte

As baixas velocidades de corte diminuem a produtividade sem um aumento significativo na vida da ferramenta. Com altas velocidades de corte podem ocorrer lascas e maior desgaste na aresta de corte (Weingaertner e Schroeter 2000). Weinert et al (1998), no alargamento (ferramenta monocortante) de um aço tratável termicamente, encontrou um aumento do diâmetro dos furos com maiores velocidades de corte, o que foi atribuído as maiores temperaturas geradas pela lâmina durante o corte e pelo atrito das guias durante o alisamento. Desta forma, ocorre a dilatação da ferramenta (pode ser compensado com o ajuste da lâmina). Entretanto, menores velocidades podem gerar aresta postiça de corte, que prejudica o acabamento superficial.

Nos resultados de Bezerra et al (2001), o aumento da velocidade de corte no alargamento convencional de uma liga de AlSi, resultou no aumento da rugosidade, diâmetro do furo e cilindridade, de acordo com o crescimento da vibração causado pelo aumento da velocidade de corte. Não ocorreu formação da aresta postiça de corte com menores velocidades, devido à correta utilização do fluido de corte.

Contudo, os autores Schroeter (1989) e Eckhardt (1993), nos ensaios realizados com ligas de alumínio e alargadores monocortantes, não encontraram variações significativas da rugosidade, erro de forma e sobremedida do diâmetro do furo com a variação da velocidade de corte. Todavia, Kress (1974), detectou (na usinagem de aços) o pequeno aumento de R_t com o aumento da velocidade de corte até 160 m/min, sendo que a rugosidade começa a reduzir-se a partir de 240 m/min; porém, não encontrando nenhuma relação para a circularidade e cilindridade.

Segundo Kress, com um alargador com duplo ângulo de entrada, sendo o primeiro ângulo bem reduzido, a espessura de cavaco é menor o que reduz as vibrações, permitindo o aumento da velocidade de corte sem alterar o acabamento do furo. Com relação à espessura das guias, para maiores velocidades de corte as mesmas deveriam ser mais largas (melhor guia, menor desvio de forma), porém, a rugosidade seria prejudicada.

Em Kress (1974), Weingaertner e Schroeter (2000) e Eckhardt (1993), é recomendado a alimentação interna de fluido de corte das ferramentas, pois é possível utilizar maiores velocidades de corte sem prejudicar o acabamento do furo alargado, pois ocorre a melhor lubrificação das réguas de guias e da aresta de corte.

2.1.7.2 Avanço

O avanço depende principalmente do tipo e geometria do alargador, profundidade de corte e acabamento superficial requerido. É recomendado a redução do avanço com o aumento da profundidade de corte. Um avanço muito alto geralmente diminui a qualidade da superfície do furo, e um avanço muito baixo pode gerar uma superfície deformada devido ao esmagamento e não corte da aresta durante a usinagem (Ferraresi 1975, Weingaertner 2001 e Eckhardt 1993).

Com maior taxa de avanço ocorre a melhora da precisão do diâmetro do furo, pois segundo Bezerra et al (2001) e Schroeter (1989), avanços pequenos aumentam o tempo de contato da ferramenta com as paredes do furo, o que geralmente tende a abri-los. Eckhardt (1993) encontrou nos seus ensaios, valores de aumento do diâmetro do furo com o aumento do avanço, o que pode ser atribuído ao aumento dos esforços de corte. Segundo Kress (1974), devido ao aumento na espessura do cavaco com o aumento do avanço, há o aumento da rugosidade superficial e pequena melhora na circularidade do furo (o que não ocorreu com a cilindridade). Estas diferenças podem ser explicadas, devido à utilização de geometrias de alargadores diferenciadas nos ensaios realizados pelos autores.

Nos ensaios com alargadores convencionais, Bezerra et al (2001), verificaram a piora da rugosidade superficial e da cilindridade com o aumento das velocidades de avanço. Já Schroeter (1989) e Eckhardt (1993), nos ensaios com alargadores com única aresta de corte, não encontraram variações significativas da circularidade e cilindridade com a variação do avanço. Entretanto, Eckhardt verificou o aumento da rugosidade superficial com o aumento do avanço da ferramenta, o que não foi verificado por Schroeter.

Um avanço muito baixo pode gerar uma superfície deformada devido ao esmagamento das paredes do furo, sendo que durante a usinagem não ocorre o corte adequado pela aresta (Ferraresi 1995). Nos ensaios de Bezerra et al (2001) é possível confirmar o efeito supracitado.

2.1.7.3 Profundidade de Corte

A influência da profundidade de corte no alargamento é maior para a rugosidade dos furos, pois uma pequena quantidade de material removido ocasiona o esmagamento do mesmo (deformação plástica) que produz irregularidades na superfície. Com valores maiores de profundidade de corte, ocorre o aumento dos esforços de corte gerando vibrações, o que pode piorar a rugosidade superficial (Bezerra et al 2001, Schroeter 1989 e Eckhardt 1993). Segundo Bezerra, os mesmos fenômenos que perturbam a rugosidade podem ser considerados para os erros de forma.

Kress (1974) comenta que o desalinhamento do eixo da ferramenta com o eixo do pré-furo a ser alargado gera o defeito de cilindridade, pois ocorre a variação da profundidade de corte causado por este desalinhamento.

Com relação a sobremedida do diâmetro após usinado, Eckhardt encontrou em sua pesquisa o decréscimo destes valores com o aumento da profundidade de corte. Esta conclusão é oposta ao encontrado por Schroeter e Bezerra, porém as geometrias dos alargadores eram diferentes, o que pode explicar este antagonismo. Todos os fabricantes de alargadores recomendam a utilização de um maior ângulo de entrada do alargador para um maior sobrematerial.

2.1.8 Problemas e Soluções Comuns no Processo de Alargamento

TABELA 1 – PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS NO PROCESSO DE ALARGAMENTO

continua

PROBLEMA	SOLUÇÃO
Furo cônico	Melhorar coaxialidade entre o pré-furo e o fuso da máquina; Diminuir a conicidade da aresta de corte (se saída cônica), e aumentar a conicidade se entrada cônica; Reduzir velocidade de avanço; Trocar guias gastas (para alargadores com única aresta de corte); Reduzir batimento radial da ferramenta.
Diâmetro maior	Melhorar coaxialidade entre o pré-furo e o fuso da máquina; Ajustar diâmetro do alargador.
Furo descentralizado/ovalizado	Aumentar folga entre guia e lâmina (única aresta de corte); Ajuste da posição axial da lâmina (única aresta de corte); Aumentar sobrematerial; Reduzir batimento radial da ferramenta; Diminuir os esforços na fixação da peça.
Facetados / empastamento de material	Melhorar coaxialidade entre o pré-furo e o fuso da máquina; Aumentar a conicidade da aresta de corte; Aumentar folga entre guia e lâmina (única aresta de corte); Melhorar condições de refrigeração (vazão, pressão e concentração do fluido).
Furo fletido	Alterar geometria da aresta de corte; Melhorar pré-furo; Aumentar a profundidade de corte; Ajuste da posição axial da lâmina (única aresta de corte).

TABELA 1 – PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS NO PROCESSO DE ALARGAMENTO

PROBLEMA	SOLUÇÃO
Mal acabamento superficial	<div>conclusão</div> Redução da velocidade de avanço; Otimizar velocidade de corte; Melhorar condições de refrigeração (vazão, pressão e concentração do fluido); Utilizar guias em PCD (menor aderência de material); Aumentar o sobrematerial; Ferramenta desgastada; Alterar geometria da aresta de corte.

FONTES: CATÁLOGO DE MAPAL 2003, BECK 1996, ELLIOTT 2003, SECO 2002.

2.2 FLUIDOS DE CORTE

Em 1868, W. H. Northcott escreveu sobre o significativo aumento na produtividade causado pelo uso de fluidos durante o corte dos materiais (Schroeter 1989 e Weingaertner e Schroeter 2000). Em 1883, F. W. Taylor mostrou que se poderia aumentar a velocidade de corte em 30% a 40%, utilizando água como fluido de corte. Porém, uma desvantagem da água é o fato dela causar corrosão nos materiais ferrosos. Surgiram misturas contendo óleos graxos e minerais, com o intuito de reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça. Entretanto, os óleos integrais, em virtude de sua grande lubricidade, reduzem o atrito entre a ferramenta e o cavaco, porém havendo pouca refrigeração. Na tentativa de aliar as qualidades de refrigeração e lubrificação, as emulsões e soluções foram desenvolvidas. Estas misturas (óleo e água) oxidam menos os materiais (peça e máquina) e apresentam poder lubrificante (Sales 1999).

Devido às pressões de agências de proteção ambiental e de saúde, associado às legislações, os fluidos atuais são menos nocivos. Eles devem apresentar boas propriedades para o seu trabalho, mas em contrapartida devem ser facilmente descartados, para o seu tratamento e retorno ao meio ambiente.

Os fluidos de corte podem ter aumentada a sua vida com a implementação de um eficiente programa de gerenciamento, que garante o desempenho adequado ao fluido (Weingaertner e Schroeter 2000 e Iowa Waste Reduction 1996).

Os fluidos de corte para o processo de alargamento necessitam de uma boa lubricidade, garantindo uma boa qualidade superficial e a integridade das guias dos alargadores (Eckhardt 1993 e Kress 1974). Em todos os catálogos de fabricantes de alargadores com única aresta de corte é recomendada a utilização de fluidos de corte (de preferência interna), isto devido à lubrificação das guias, aumento da vida das lâminas e eliminação dos cavacos.

Segundo Bates (1999), as réguas de guias não entram em contato com a parede do furo, pois existe uma fina camada de lubrificante que cria uma superfície hidrodinâmica entre a ferramenta e o furo. Para a garantia deste filme hidrodinâmico, Bates recomenda a utilização de fluidos de corte com no mínimo 30% de óleo mineral em sua formulação. Segundo o fabricante Seco (2002), é necessário pelo menos 40% de óleo mineral para ferramentas de aresta única de corte.

Nos estudos de Kress (1974), a alimentação interna de fluido de corte no alargador melhora a condição de usinagem, pois reduz o defeito de circularidade do furo e possibilita o aumento da velocidade de corte sem qualquer influência a rugosidade do furo. A pressão de refrigeração é um fator importante para as ferramentas com alimentação interna de fluido de corte, pois uma elevada pressão de refrigeração pode induzir a vibrações no alargador, e uma baixa pressão tende a aumentar a rugosidade. Eckhardt (1993) encontrou menores esforços de usinagem e melhor acabamento superficial durante o alargamento de peças de alumínio com ferramentas com alimentação interna de fluido de corte.

Para um alargador com única aresta de corte e diâmetro de 10 mm, por exemplo, os fabricantes recomendam uma vazão de fluido de corte entre o mínimo de 5 L/min (Seco 2002) e máximo 20 L/min (Beck 1996), e uma pressão de alimentação interna entre 10 bar (Mapal 2003) e 30 bar (Beck 1996). A concentração e o tipo da emulsão (sintética ou não) depende do material da peça, material das guias e lâmina e velocidade de corte (Elliott 2003 e Eckhardt 1993).

A utilização de emulsões é economicamente viável, contudo nos ensaios de Schroeter (1989), o óleo integral obteve melhores resultados de rugosidade e circularidade do furo, devido ao maior poder de lubrificação, e menores esforços de usinagem, o que acarretou em uma menor influência na sobremedida do furo.

Lugscheider et al (1997) compararam os desgastes de alargadores com única aresta de corte em metal duro revestido (TiAlN obteve melhor resultado) na

usinagem a seco do ferro fundido, e com mínima quantidade de lubrificação na liga AlSi eutética, porém sem analisar o acabamento superficial.

No alargamento do aço inoxidável austenítico 316L, Zeng, Belluco e De Chiffre (2001), verificaram que as propriedades lubrificantes dos fluidos de corte são mais significativas a baixas velocidades de corte, com grande influência sobre a melhora do acabamento superficial do furo e redução do torque e força de corte. Também ficou evidenciado que a variação de sobrematerial de usinagem maximiza a sensibilidade da utilização de fluido de corte.

2.2.1 Funções dos Fluidos de Corte

A principal função dos fluidos de corte é de controlar a temperatura durante a usinagem, através da refrigeração e lubrificação (Iowa Waste Reduction 1996). A refrigeração é usual em altas velocidades de corte, enquanto a lubrificação apresenta maior significado em baixas velocidades de corte e usinagem mais severas (Sales 1999). Com altas velocidades de corte não há tempo para o fluido penetrar na interface cavaco-ferramenta; e a baixas velocidades de corte a refrigeração é menos importante (Shaw 1997).

Outras funções associadas aos fluidos de corte são descritas por Ferraresi (1995) e Machado e Silva (2003): retirada de cavaco da região de corte (não danificar a superfície da peça); proteção da peça e máquina-ferramenta contra corrosão; redução do ângulo de recalque do cavaco (menor deformação do cavaco); redução dos esforços de corte (reduzindo as vibrações); redução da formação da aresta postiça de corte; e redução na temperatura da peça (maior precisão dimensional).

Um bom fluido de corte deve inibir a corrosão e oxidação da peça e da máquina-ferramenta (Runge e Duarte 1989). Os fluidos de base sintética e integrais são melhores agentes anticorrosivos. Dois tipos de filmes são formados pelos fluidos de corte: polar e passivado. O filme polar é formado por componentes orgânicos que bloqueiam as reações químicas; e o filme passivado é formado por componentes orgânicos que contêm oxigênio no filme (Iowa Waste Reduction 1996). Os fluidos de corte podem atacar ao acrílico, devido à presença de água, e a pintura (devido à má

qualidade de tintas e massas de fundo) das máquinas-ferramentas (Runge e Duarte 1989).

No artigo escrito por Suda et al (2003), é comparado a capacidade biodegradável e de estabilidade a oxidação de fluidos de corte integrais minerais, ésteres sintéticos e vegetais. Os óleos minerais tem a pior condição biodegradável e os óleos vegetais tem a melhor biodegradabilidade. Os ésteres sintéticos têm grande variação biodegradável, o que depende da sua estrutura molecular combinada com ácidos e álcoois. Com relação à estabilidade à oxidação, os óleos vegetais apresentam o pior resultado (Suda et al 2003). Contudo, o fluido de corte deve ser bioestável, ou seja, ter uma certa estabilidade em relação a biodegradabilidade, pois não pode ser atacado por microorganismos em um curto período. Entretanto, os fluidos devem ter fácil descarte e não prejudicar o meio-ambiente, o que é, de certa forma, antagônico ao idéia de estabilidade (Sales 1999).

Segundo Runge e Duarte (1989), os fluidos de corte em forma de emulsão ou concentrada, devem chegar à área de corte mantendo a forma homogênea, pois os mesmos são instáveis. Desta forma, a estocagem e agitação adequada é necessária aos fluidos de corte. O mesmo deve ser considerado com relação às bactéria e aos fungos que podem aparecer em grandes quantidades, podendo prejudicar uma emulsão ou entupir bombas e danificar equipamentos (Iowa Waste Reduction 1996).

2.2.1.1 Lubrificação e refrigeração

A refrigeração está relacionada com a capacidade do fluido de corte em absorver calor e umectar (capacidade de molhar) a superfície da peça. A absorção de calor de um fluido varia conforme a viscosidade, calor específico e condutividade térmica. A lubrificação permite que as saliências do cavaco deslizem sobre a superfície da ferramenta, formando um filme, evitando a soldagem de partículas na ferramenta (aresta postiça de corte) que são prejudiciais ao acabamento da peça usinada. O fluido de corte penetra parcialmente na interface cavaco ferramenta, reduzindo o atrito e a geração de calor, o que aumenta o ângulo de cisalhamento do cavado, tornando-o de menor espessura, reduzindo os esforços de usinagem (Runge e Duarte 1989).

Em baixas velocidades de corte a geração de calor é menor e a lubrificação deve ser evidenciada, pois o atrito pode levar a formação de aresta postiça de corte, e o óleo deve formar um filme na interface entre a ferramenta e a peça (Machado e Silva 2003 e Iowa Waste Reduction 1996). A redução do contato entre o cavaco e a ferramenta de corte, devido ao filme lubrificante formado por reação química ou adsorção mecânica, apresenta resistência ao cisalhamento menor que a do material em contato com a ferramenta. Isto restringe a formação de aresta postiça de corte, garantindo melhor acabamento superficial (Machado e Silva 2003).

Em maiores velocidades de corte, o fluido tende a escoar para fora da zona de escorregamento de cavaco da ferramenta. Isto decorre da ação hidrodinâmica da rotação da peça ou ferramenta, não permitindo a penetração do fluido na zona de corte por capilaridade. Ferraresi (1995) comenta que devido às altas pressões e temperaturas na interface cavaco-ferramenta, o fluido de corte tende a penetrar nesta região em estado gasoso. Desta forma, os fluidos de corte para altas velocidades devem ter maiores características refrigerantes. Entretanto, reduz-se a temperatura das zonas de cisalhamento, o que diminui o amolecimento do material a ser cortado, aumentando os esforços de corte e a potência consumida durante a usinagem (Trent 1988 e Sales 1999). Contudo, Suda et al (2002), no processo de rosqueamento de aço, encontrou menor torque de usinagem com a utilização de emulsão convencional a 10% em abundância, seguido por éster sintético e óleo vegetal administrados via mínima quantidade de lubrificante, e com pior resultado para a usinagem a seco.

A capacidade de refrigeração de um fluido de corte diminui com o aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte (Shaw 1997 e Sales 1999). Desta forma, com as altas temperaturas na aresta de corte pode ocorrer a difusão metálica entre os materiais em contato (cavaco e ferramenta), o que pode enfraquecer a superfície da ferramenta e diminuir exponencialmente sua vida (Weingaertner e Schroeter 2000).

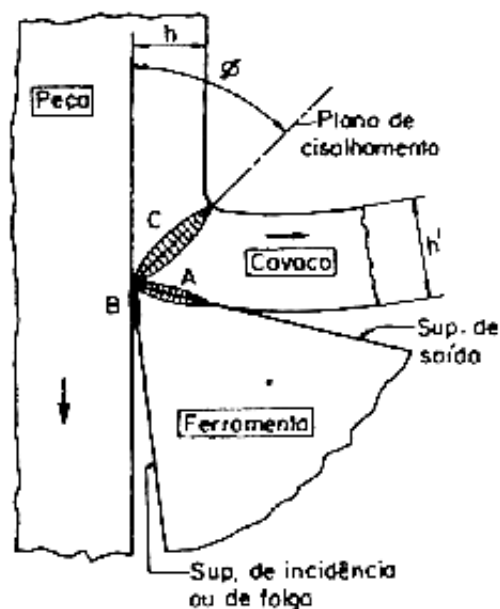
Com o aumento das velocidades de corte ocorre o aumento da temperatura, o que pode desgastar ou danificar a ferramenta prematuramente. Os fluidos de corte tendem a minimizar estes desgastes e garantem a utilização de velocidades de corte economicamente viáveis (Sales 1999 e Machado e Silva 2003). Entretanto, os fluidos de corte podem reduzir a vida de uma ferramenta. Conforme descrito por

Sales (1999), a variação térmica em alguns processos de fresamento (choques térmicos em ferramentas frágeis) e a corrosão devido ao contato do fluido de corte em regiões desgastadas da ferramenta, são alguns exemplos de piora de desempenho das ferramentas com a utilização de fluido de corte.

2.2.2 Tribologia na Interface Cavaco-Ferramenta

A formação do cavaco durante a usinagem inicia-se pela deformação elástica do material, que após ultrapassar o limite de escoamento promove a deformação plástica do mesmo. Com o aumento das tensões, o limite de resistência do material é alcançado, resultando na ruptura e gerando o cavado. Este ponto de ruptura é definido pelo plano de cisalhamento que cria a região da zona de cisalhamento primária (Sales 1999 e Trent 1988). O escoamento do cavaco pela superfície de saída da ferramenta gera uma zona de cisalhamento secundária, que pode ser visualizada na região A da fig. 9.

FIGURA 9 – FONTES DE CALOR E ZONAS DE CISALHAMENTO NA FORMAÇÃO DO CAVACO



FONTE: FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais, 1995.

Segundo Weingaertner e Schroeter (2000), a aplicação de fluido de corte na zona de cisalhamento secundária (A) diminui o atrito entre o cavaco e a ferramenta,

reduzindo o calor gerado. A redução do calor gerado e do coeficiente de atrito aumenta o ângulo de cisalhamento, reduzindo a taxa de deformação, que conseqüentemente diminui a quantidade de calor gerado durante o corte.

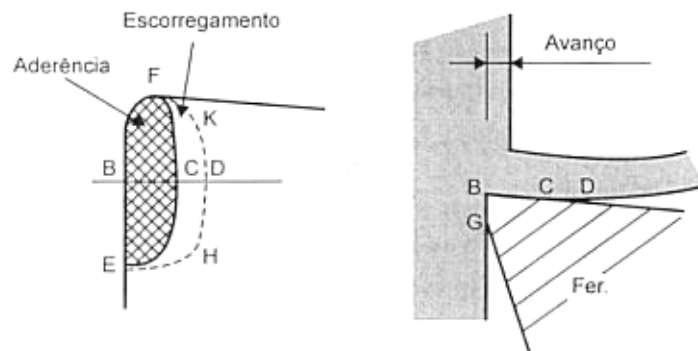
A interface entre o cavaco e a ferramenta mostra a existência de duas regiões: região de aderência, que é próxima à aresta de corte e tem total contato entre o cavaco e a ferramenta a altas pressões; e região de escorregamento, que está localizada ao redor da zona de aderência e permite o contato dos picos e irregularidades do cavaco e da ferramenta cortante (Machado e Silva 2003).

2.2.2.1 Zonas de aderência e escorregamento

A zona de aderência é definida pela região de atrito entre o cavaco e a ferramenta na qual a área aparente de atrito e a área real de atrito (picos) são iguais. O fluxo de material ocorre no cavaco, na zona de cisalhamento (zona de fluxo). Há uma camada de material em contato com a ferramenta que é estacionária, porém logo acima, o material assume a velocidade de saída do cavaco. Devido à deformação plástica, são geradas altas temperaturas e tensões de compressão, que além da afinidade química entre a ferramenta e o cavaco, podem causar a aderência na ferramenta (Trent 1988 e Sales 1999). Alguns autores defendem que o lubrificante não tem acesso à zona de aderência, pois não há espaço para a penetração do fluido de corte. Assim, a zona de escorregamento tem grande importância no contato entre cavaco e ferramenta (Machado e Silva 2003).

Na zona de escorregamento não existem ligações da ferramenta com o cavaco, desaparecendo a zona de fluxo. A área de atrito real é muito menor que a área aparente (Sales 1999). Na fig. 10 podem-se ver as zonas de aderência e escorregamento.

FIGURA 10 – ZONAS DE ADERÊNCIA E ESCORREGAMENTO



FONTE: TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure, 1988 (fig. adaptada).

2.2.2.2 Temperatura de usinagem

Nos processos de usinagem ocorre grande geração de calor devido ao cisalhamento do material (Sales 1999 e Machado e Silva 2003). No torneamento, cerca de 10% do calor gerado vai para a ferramenta, porém em um pequeno volume de material são geradas regiões com temperaturas extremas e com elevados níveis de tensões, que pode deteriorar a ferramenta. Na fig. 9, também é mostrada a geração de calor durante a usinagem: regiões A, B e C.

Na área B, ou de cisalhamento secundário, o calor gerado tem grande influência sobre a vida da ferramenta. A temperatura desta zona depende do trabalho realizado para o cisalhamento do material durante o corte, a velocidade e quantidade do mesmo que passa pela zona de escorregamento (Trent 1988).

Segundo Machado e Silva (2003), com o aumento da velocidade de corte maior calor é gerado, aumentando a quantidade de calor vai para o cavaco e para o meio ambiente, pois aumenta a troca de calor por convecção do cavaco e da peça com o meio. Porém, o percentual de calor que chega à ferramenta também aumenta com a velocidade de corte, devido ao aumento da taxa de deformação. O fluido de corte como lubrificante reduz a área de contato entre o cavaco e a ferramenta (zona de escorregamento), contudo o mesmo deve penetrar nesta área e formar um filme entre o cavaco e a ferramenta.

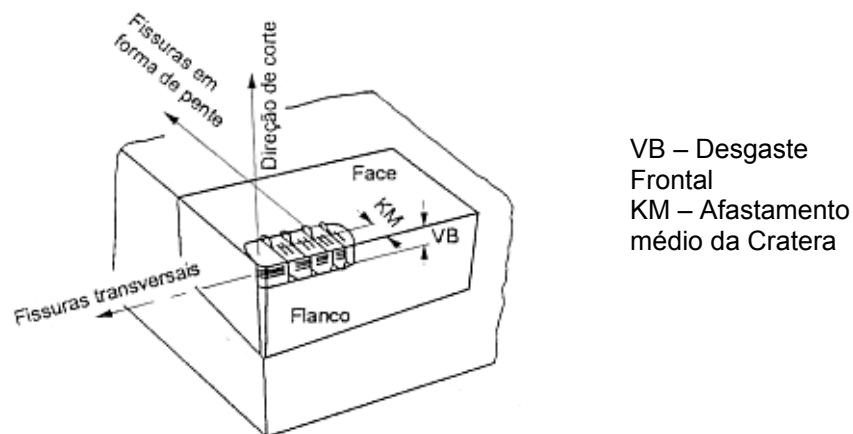
Nos ensaios realizados por Sales (1999) para o torneamento em aço, os fluidos de corte que tem maior capacidade de refrigeração apresentaram maior temperatura na interface do cavaco-ferramenta, sendo o corte a seco e com fluido

integral obtiveram menores temperaturas. Isto ocorreu devido aos fluidos à base de água que provocam o maior resfriamento da zona de cisalhamento primário diminuindo a resistência ao cisalhamento do material que aumenta a temperatura na interface cavaco-ferramenta. Assim é explicado porque as emulsões sintéticas com maior concentração alcançaram menores temperaturas. O fluido integral apresentou menores temperaturas que o corte a seco, pois há a maior lubricidade entre o cavaco e a ferramenta.

2.2.2.3 Mecanismos e formas de desgaste

Com o cisalhamento do material da peça durante a usinagem, a ferramenta fica exposta às elevadas solicitações térmicas e mecânicas, causadas pelo atrito e esforços de usinagem. O desgaste é o principal responsável pelo fim de vida das ferramentas de corte. Na fig. 11 podem ser visualizados algumas formas de desgaste.

FIGURA 11 – FORMAS DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE



FONTE: FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais, 1995.

O desgaste frontal ou de flanco se origina devido à abrasão de partículas duras na ferramenta, ou pelo próprio desprendimento de partículas aderidas que se soltam durante o corte. O desgaste abrasivo, além de prejudicar a superfície de folga, também tem efeitos negativos sobre a superfície de saída da ferramenta (Sales 1999).

A deformação plástica da aresta de corte é causada pelas altas tensões de compressão e altas temperaturas, devido a grandes avanços e velocidades de corte (Stemmer 1995).

O lascamento da ferramenta ocorre normalmente na aresta de corte e na quina da ferramenta devido às excessivas forças de corte, fragilidade no material da ferramenta e interrupções durante a usinagem, que por sua vez podem ser causados por corte interrompido e inclusões não-metálicas no material da peça.

Os entalhes ou fissuras transversais também são causados pelo corte interrompido, que gera um esforço alternado causando a fadiga na aresta de corte. As fissuras longitudinais são causadas pela fadiga térmica da ferramenta, causada pela alternância entre aquecimento e resfriamento da aresta de corte sob esforços (Weingaertner e Schroeter 2000). A distribuição de temperatura depende principalmente da velocidade de corte, avanço e a relação do tempo ativo e inativo de corte, do material da ferramenta e da peça. A oscilação de temperatura também pode ser ocasionada pelo acesso irregular do fluido de corte (Ferraresi 1995).

As altas temperaturas podem reduzir a resistência ao escoamento do material da ferramenta, assim ocorrendo à retirada de material da superfície da mesma, gerando crateras na superfície de saída (área de escorregamento). A craterização também pode ser causada pelo mecanismo de difusão química entre os átomos da peça e da ferramenta. No desgaste difusivo alguns elementos químicos são transferidos da peça para a ferramenta e vice-versa, dependendo da temperatura e solubilidade dos elementos envolvidos na região de escorregamento (Sales 1999). Na região de saída da ferramenta, o cavaco adere em uma pequena camada na qual sua velocidade é zero. Nesta camada plástica o escoamento do cavaco varia de zero até a velocidade de saída do mesmo. Desta maneira, esta região de contato permite a difusão de elementos químicos, pois há condições de temperatura e tempo suficiente; se houver afinidade entre os elementos químicos (Ferraresi 1995).

O desgaste por aderência ocorre normalmente em baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material na superfície de saída se torna irregular, devido da formação de aresta postiça de corte (Sales 1999). Na formação do cavaco existem grandes deformações do material da peça aliado a uma elevada temperatura, que proporciona o caldeamento de partículas na superfície da ferramenta (Weingaertner

e Schroeter 2000). Desta forma, estes fragmentos micro-soldados dificultam o deslizamento do cavaco, aumentando o atrito, que em um certo momento arrasta estas partículas juntamente com o fluxo de material nas superfícies de folga e saída. O deslocamento destas partículas encruadas gera o desgaste abrasivo na ferramenta (Stemmer 1995). O aumento da frequência de saída destas partículas aumenta o desgaste da superfície de folga (Ferraresi 1995).

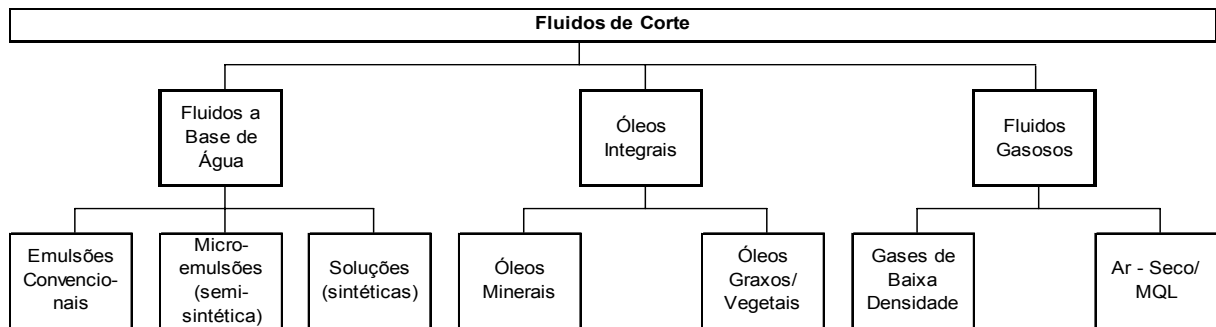
Dependendo da liga do material da ferramenta e da temperatura de aquecimento durante o corte, pode ocorrer o mecanismo de oxidação. A oxidação ocorre normalmente na zona de escorregamento da superfície de saída e na parte inferior da superfície de folga (Sales 1999). Ferramentas de aço rápido dificilmente oxidam durante a usinagem, pois sua resistência ao calor é menor que sua temperatura de formação do óxido. O metal duro oxida na faixa de 700 a 800 °C, que pode formar óxidos complexos de tungstênio, cobalto e ferro, que devido ao seu maior volume em relação ao carboneto de tungstênio cria irregularidades na superfície da ferramenta, levando ao lascamento e a possível quebra (Weingaertner e Schroeter 2000).

2.2.3 Classificação dos Fluidos de Corte

Na escolha de um fluido de corte deve-se levar em consideração alguns fatores; como custo e expectativa de vida, compatibilidade com o material da peça e componentes da máquina, parâmetros de corte utilizados, facilidade da manutenção e controle de qualidade do fluido e fácil reciclagem e descarte do fluido, além da característica do processo que necessita de um fluido de corte com maior poder de refrigeração ou lubrificação (Iowa Waste Reduction 1996 e JP Industrie 1998).

Alguns autores classificam os fluidos de cortes como aquosos ou miscíveis em água (forma de emulsão ou solução) e à base de óleo mineral. Entretanto, há também a classificação como fluidos à base de óleo e os fluidos químicos (sintéticos e semi-sintéticos). A classificação mais aceita e que será considerada neste trabalho são os fluidos à base de água, os fluidos compostos somente de óleos integrais e os fluidos gasosos. Na fig. 12 é mostrado um esquema da classificação dos fluidos de corte.

FIGURA 12 – CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE



Na utilização de fluidos gasosos, o ar está presente na usinagem a seco e na usinagem com mínima quantidade de lubrificação. Há também a utilização de gases de baixa densidade como argônio e nitrogênio, que tem grande penetração na zona de corte, boa capacidade de refrigeração e proteção contra a oxidação, entretanto são de elevadíssimo custo (Weingaertner e Schroeter 2000). A ação química de gases como o oxigênio, por exemplo, é a formação de óxido de ferro (Fe_3O_4) na superfície de saída da ferramenta, formando uma fina camada lubrificante negra (Ferraresi 1995).

2.2.3.1 Emulsões e aditivos

As emulsões convencionais apresentam uma fase oleosa dispersa na fase aquosa. A fase oleosa é composta de óleos minerais que através dos emulsificadores tornam-se miscíveis na água. Os emulsificadores reduzem a tensão superficial, formando uma película monomolecular na interface óleo-água (Sales 1999 e Machado e Silva 2003). As pequenas gotículas (miscelas) dispersas na água refletem a luz, o que determina uma coloração leitosa ao fluido (dependendo do tamanho das miscelas). Uma desvantagem dos fluidos a base de água é a proliferação de microorganismos, que deve ser controlado com a aplicação de biocidas. Os acopladores fazem a ligação do óleo mineral ao emulsificador, compatibilizando o óleo a água. São geralmente álcoois sintéticos (Runge e Duarte 1989).

Os fluidos semi-sintéticos são emulsões na qual parte do óleo mineral é substituída por um produto sintético solúvel em água. Possuem de 5% a 50% do

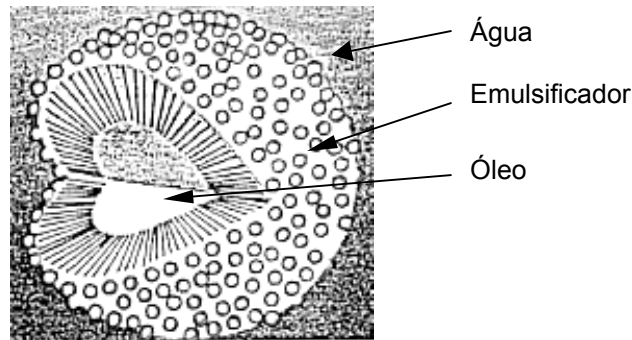
óleo concentrado de base mineral (JP Industrie 1998). Os fluidos semi-sintéticos possuem grande quantidade de emulsificadores, formando micro-emulsões com misturas muito pequenas, o que aumenta a lubrificidade do fluido. Podem apresentar emulsões translúcidas ou transparentes. Estes fluidos possuem melhores propriedades de umectação, que permite maiores velocidades de corte em relação às emulsões convencionais. Também têm maior poder de detergência, para melhor limpeza da peça (Runge e Duarte 1989, Iowa Waste Reduction 1996 e Sales 1999). A parte sintética destes fluidos são normalmente ésteres, que são compostos por ácidos graxos e álcoois, e podem apresentar vantagens sobre os óleos minerais.

As emulsões contêm vários tipos de aditivos em sua composição, sendo que o concentrado da emulsão é composto por acopladores, emulsificadores, inibidores de corrosão, biocidas, antiespumantes, aditivos antidesgaste polares e de extrema pressão (JP Industrie 1998 e Runge e Duarte 1989).

Os emulsificadores podem ser iônicos ou não-iônicos. Os iônicos dissociam-se em íons positivos e negativos quando dissolvidos em água e podem ser do tipo aniônico (sabões alcalinos, sabões de amino-álcoois e ésteres de ácidos fosfóricos) ou catiônico (não utilizados em fluidos de corte). Os emulsificadores não-iônicos não se dissociam quando distribuídos na água (ésteres de ácidos graxos e poliglicóis).

Nas emulsões óleo na água (emulsão normal), as gotículas de óleo (mistura) tendem a se juntar, mas devido as suas cargas eletrostáticas de mesmo sinal essas gotas de óleo se repelem promovendo o movimento permanente impedindo a formação de gotas maiores, garantido a estabilidade da emulsão. Estes materiais tensoativos possuem o poder de se concentrar na superfície de um líquido ou na superfície de dois líquidos imiscíveis. As emulsões podem ser classificadas de acordo com o tamanho de sua mistura. As emulsões grossas apresentam tamanho de mistura entre 1 e 10 μm (coloração mais opacas), e as finas têm um tamanho entre 0,01 e 1 μm (mais transparentes). O maior tamanho de mistura depende do tipo e quantidade de emulsificador adicionado; quanto mais emulsificador menor a mistura. Para uma emulsão grossa é necessário ter atenção à filtração utilizada, pois filtros muito finos podem desestabilizar a emulsão (Runge e Duarte 1989 e JP Industrie 1998). Na fig. 13 pode-se visualizar uma mistura.

FIGURA 13 – MOLÉCULA DE ÓLEO (MISCELA)



FONTE: JP INDUSTRIE, Formation Liquide de Coupe. Dossier usinage Shell, 2001.

Os antiespumantes reduzem a tensão superficial da espuma agrupando as bolhas. Utilizam-se normalmente óleos de silicones e magnésio como antiespumante. Já os materiais anticorrosivos também reduzem o desgaste através de uma película passivadora. É comum a utilização de produtos à base de nitrito de sódio em baixas concentrações. Os detergentes reduzem a deposição de materiais, e são compostos organometálicos contendo magnésio, bário e cálcio. Os biocidas matam e inibem a proliferação de microorganismos (fungos e bactérias), e devem ser utilizados em baixas concentrações. Estes produtos devem ter baixa toxicidade e ser compatível ao manejo humano. Existem vários tipos de biocidas específicos para cada tipo de bactéria ou fungo (Runge e Duarte 1989, Sales 1999 e JP Industrie 1998).

Os avanços tecnológicos nas máquinas-ferramentas e nos materiais para ferramentas de corte possibilitam maiores velocidades de corte, gerando-se a necessidade de novas características dos fluidos de corte. Esta mudança ocorreu com os aditivos químicos (antidesgaste e EP), no qual utilizam os mais variados tipos de óleos minerais, óleos graxos e aditivos a base de enxofre e fósforo (principalmente), tendo as suas aplicações específicas (Schroeter 1989 e Weingaertner e Schroeter 2000).

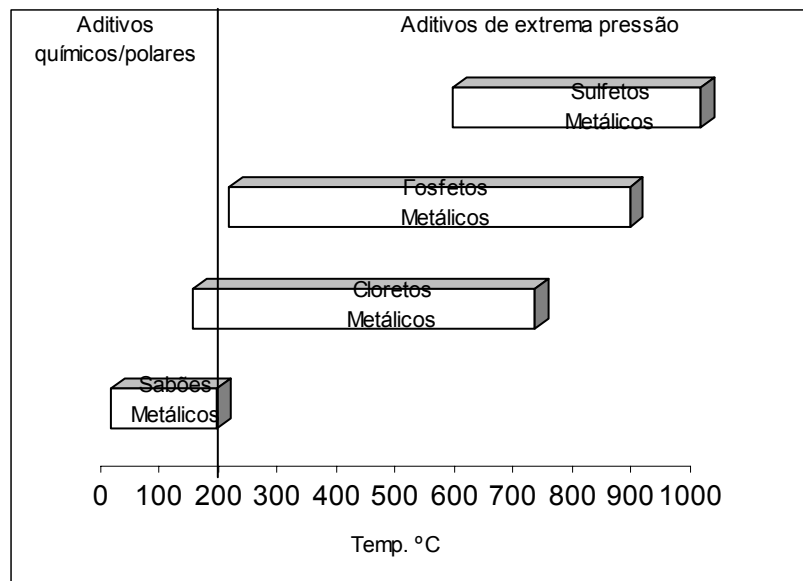
Os aditivos antidesgaste polares formam películas de ligações polares por adsorção nas superfícies metálicas que são facilmente cisalhadas. As moléculas funcionam como um ímã e são compostas por materiais (ácidos) graxos de origem animal, como óleo de mocotó e óleo de baleia; vegetal, como óleo de babaçu e óleo de colza; e sintético, como ésteres e gorduras sulfurizadas. Estes aditivos têm fixação puramente física às superfícies, sendo que a ação destes não ultrapassa

200 °C, como por exemplo, os sabões metálicos (Runge e Duarte 1989 e JP Industrie 1998). Existem vários componentes, como óleos sulfoclorados, que combinam a ação antidesgaste e de extrema pressão, com maior eficiência em maiores temperaturas (Runge e Duarte 1989).

Os aditivos de extrema pressão (EP) são utilizados para melhorar a lubricidade de um fluido, principalmente em trabalhos que exijam maiores temperaturas e pressões de corte reduzindo o atrito entre o cavaco e a ferramenta (Sales 1999). A propriedade anti-solda é necessária quando o poder lubrificante e os aditivos antidesgaste não são suficientes para resistir às elevadas pressões. Os principais elementos para esses aditivos são o enxofre ativo (dissolvido no óleo), enxofre inativo (combinado com matéria graxa), cloro (parafina clorada) e fósforo.

A reação química destes produtos se inicia acima de certas temperaturas na zona de corte formando sais na superfície da ferramenta (fosfeto de ferro, sulfeto de ferro, etc). Estes sais tem um elevado ponto de fusão, de até 1000 °C. Os aditivos de extrema pressão não reduzem o desgaste na presença de partículas metálicas livres entre a ferramenta e a área de corte, produzindo um desgaste abrasivo a três corpos (Runge e Duarte 1989).

Em alguns países, a utilização de produtos a base de cloro estão sofrendo limitação legislativas. Na fig. 14 pode-se analisar a faixa de utilização dos aditivos antidesgaste.

FIGURA 14 – TEMPERATURAS DE ATIVAÇÃO DOS ADITIVOS *EP* E ANTIDESGASTE

FONTE: JP INDUSTRIE, Formation Liquide de Coupe. Dossier usinage Shell, 2001.

2.2.3.2 Soluções

São fluidos transparentes na qual as substâncias químicas formam solução com a água. Os fluidos de corte pertencentes a esta classificação são os fluidos sintéticos. Estes fluidos não apresentam a presença de óleo mineral. Os produtos que compõe os fluidos sintéticos são os poliglicóis e ésteres de poliglicóis, que agem como agentes para mistura; ácidos bóricos, éster de ácido fosfórico e ácidos orgânicos, que atuam na lubrificação; e sais de trietanolamina, aminas e nitritos, que previnem a oxidação e estabilizam a solução (Iowa Waste Reduction 1996 e JP Industrie 1998).

Os fluidos sintéticos possuem alta capacidade de refrigeração, filmes residuais de fácil remoção, boa estabilidade com uma grande vida útil (se mantido adequadamente), excelente controle microbiológico e de corrosão, pouca geração de espumas e grande poder de umectação. Estes fluidos apresentam queda em suas propriedades com a contaminação de outros óleos (*tramp oil*). Apresentam incompatibilidade com elementos das máquinas-ferramentas, além de um custo elevado (Weingaertner e Schroeter 2000 e Iowa Waste Reduction 1996).

No teste de desgaste Four Balls realizados por Jain e Shukla (1996), mostra que a adição de materiais graxos e sólidos inorgânicos nos fluidos de cortes

sintéticos melhoram a condição tribológica do mesmo. A adição de aditivos de extrema pressão melhora a propriedade de adesão e de desgaste.

2.2.3.3 Óleos integrais

Estes óleos são óleos minerais puros ou com aditivos de extrema pressão. Tem menor poder de refrigeração, tendo menor eficiência em altas velocidades de corte. São hidrocarbonetos obtidos do refinamento do petróleo cru, sendo suas propriedades dependentes do tamanho da cadeia e grau de refino (Sales 1999).

Os óleos minerais utilizados podem ser de base parafínica ou naftênica. Os óleos naftênicos são mais facilmente emulsionados e permite dissolver maior quantidade de enxofre (melhor propriedade de extrema pressão), além de melhor resposta antioxidante (Holm 2002). Entretanto, os óleos de base naftênica apresentam maior toxidade, maior custo, menor viscosidade e maior agressividade a borrachas e plásticos (Runge e Duarte 1989).

Nos ensaios de esclerimetria pendular, Sales (1999), demonstrou que o óleo integral apresentou melhor condição de lubrificação, seguido pelo fluido emulsinável, a seco, sintético e água; e menor capacidade de retirada de calor.

Devido às legislações mais rigorosas referente aos fluidos de corte, há a utilização (em pequena escala) de fluidos a base de óleos graxos vegetais. Estes são mais biodegradáveis e apresentam menores impactos ambientais, porém com maior custo. Nos ensaios de Belluco e De Chiffre (2002), foi encontrado um menor valor de rugosidade e menor profundidade de camada deformada no alargamento de aço inoxidável com óleo vegetal aditivado em relação ao óleo mineral aditivado.

Os óleos vegetais apresentam grande capacidade de solvência e alta viscosidade (De Chiffre e Belluco 2000).

2.2.4 Comparativo entre os Fluidos de Corte

Existem vários ensaios de usinagem comparando os fluidos de corte, principalmente entre classes diferentes, como o comparativo entre um óleo integral e uma emulsão.

Devido a regulamentações, alguns elementos dos fluidos de corte não podem ser mais utilizados nas formulações, substituindo alguns componentes por materiais mais biodegradáveis como óleos vegetais e ésteres. Os ensaios utilizados para conhecer a capacidade tribológica de um fluido de corte (Four Balls, Tinkem e Falex Pin) analisam o potencial de lubrificação dos fluidos de corte. (Belluco e De Chiffre 2002). Contudo, os resultados dos ensaios de fluidos de corte baseados na usinagem, de maneira geral, são específicos às combinações das variáveis utilizados na usinagem; como máquina, ferramenta, material da peça, gama de operações e condições de corte (Belluco e De Chiffre 2002).

Nos ensaios de furação de um aço liga, Sales (1999) identificou o fluido integral com maior vida da broca, seguido pela emulsão comum, fluido sintético e com pior resultado para o corte a seco. Entretanto, com maiores velocidades de corte (40 m/min) a emulsão comum obteve pior resultado que os fluidos sintéticos. Para fluidos a base de água, De Chiffre e Belluco (2002) encontraram maior vida da broca na usinagem de aço inoxidável austenítico com fluidos com óleo vegetal como base, seguido pela solução sintética (éster) e com pior resultado os fluidos de base mineral (todos a 5%). Nos ensaios com fluidos integrais a pior condição de vida ficou com o óleo mineral, seguido pela mistura de óleo vegetal e éster com baixa aditivação, seguido após pelo óleo de éster; e com melhores resultados aparece à mistura de óleo vegetal e éster com alta aditivação de extrema pressão.

Para a força de avanço na furação, Sales (1999) observou menores valores para o fluido integral. Em baixas velocidades de corte o fluido sintético obteve resultados próximos ao de corte a seco (altas forças de avanço), porém em maiores velocidades seu desempenho foi superior, devido à capacidade de refrigeração. A rugosidade também foi melhor para o fluido integral, seguido pelo fluido sintético com maior concentração. De maneira geral, para a furação de aço liga com brocas de aço rápido, o fator lubrificação é predominante.

De Chiffre e Belluco (2002) mostram pequena diferença nos esforços de furação e no torque durante o rosqueamento do aço inoxidável para os óleos puros. Entretanto, percebeu-se variação do torque no rosqueamento de latão, sendo que o óleo mineral e a mistura de óleo vegetal e éster com baixa aditivação de extrema pressão obtiveram a melhor performance. Já os fluidos a base de água, a emulsão

de óleo vegetal obteve melhor resultado de torque no rosqueamento do aço inoxidável.

2.2.5 Fluido de Corte e o Processo de Alargamento

A precisão do furo alargado depende principalmente do pré-furo, rigidez da máquina, parâmetros de corte e adequada aplicação de fluido de corte. A falta de fluidos de corte no processo de alargamento produz alta temperatura que pode resultar em problemas na precisão do furo e excessiva formação de aresta postiça de corte e empastamento de material da peça na ferramenta, que prejudica o acabamento superficial do furo (Lugscheider et al 1997).

Os fluidos de corte à base de óleos minerais vêm perdendo espaço para os fluidos de corte que apresentam uma formulação com óleos naturais e ésteres biodegradáveis. De forma geral, utilizam-se emulsões para o alargamento, pois além de lubrificar, estes fluidos tem grande poder de refrigeração. A análise dos fluidos de corte não é somente de interesse qualitativo da usinagem, mas também financeiro, pois os fluidos de corte têm um importante impacto no custo do produto usinado (Ávila e Abrão 2001).

Lugscheider et al (1997) encontraram problemas no alargamento a seco de aços liga e ligas alumínio. Assim, os ensaios foram conduzidos com mínima quantidade de lubrificação. Nas ferramentas sem revestimento ocorreu adesão de material, gerando variações nos resultados de rugosidade e cilindridade.

De Chiffre e Belluco (2000), em ensaios com alargador visando comparar a performance de fluidos de corte, encontraram moderada repetibilidade e grande dispersão dos resultados na comparação de fluidos de corte a base de água e integral.

2.2.5.1 Influência do fluido de corte sobre os esforços de usinagem

Nos ensaios realizados por Zeng, Belluco e De Chiffre (2001) no alargamento de aço inoxidável, a emulsão a base de óleo vegetal apresentou menores valores de torque e força passiva de usinagem, seguida pela emulsões a base de éster (sintética) e de base mineral. Em outro estudo, ainda em aço

inoxidável, Zeng, Belluco e De Chiffre (2002) verificaram menores esforços de usinagem nas emulsões à base de óleo mineral. A emulsão à base de óleo vegetal apresentou resultado próximo ao mineral. O pior resultado foi encontrado com uma emulsão à base da mistura de óleo vegetal, ácidos graxos e ésteres.

De Chiffre e Belluco (2002) verificaram grande influência do sobrematerial e dos parâmetros de corte sobre torque durante a usinagem, além da melhor performance da emulsão a base de óleo vegetal para o torque e rugosidade no alargamento de aço inoxidável austenítico. Na usinagem com óleos puros, foi encontrado menor torque no alargamento para o óleo de éster, seguido pela mistura de óleo vegetal e ésteres e após pelo óleo mineral. No alargamento do latão, a mistura de óleo vegetal e éster com aditivos de extrema pressão obteve melhores resultados de torque, seguido pelo óleo mineral e com pior performance a mistura de óleo vegetal e éster sem aditivos, mostrando a importância da capacidade de lubrificação do fluido.

2.2.5.2 Influência do fluido de corte sobre o acabamento superficial

Belluco e De Chiffre (2002) verificaram melhores resultados de rugosidade, no alargamento de aço inoxidável, utilizando óleo vegetal com aditivos de extrema pressão. A sequência de resultados, após o óleo já citado, foi a seguinte: óleo vegetal sem aditivos, óleo mineral aditivado e óleo mineral sem aditivos. Os valores de rugosidade média (R_a) variaram de 0,4 μm para o melhor resultado e 1,1 μm para a pior performance. Em termos de profundidade de sub-camada afetada devido ao processo de alargamento (endurecida), Belluco e De Chiffre mediram a micro-dureza dos corpos de prova, sendo que os óleos vegetais apresentaram resultados equivalentes aos minerais.

Segundo Zeng, Belluco e De Chiffre (2002), as emulsões à base de óleo vegetal e mineral aditivados alcançaram o mesmo nível de rugosidade média. O fluido a base de óleo vegetal sem aditivos de extrema pressão mostraram resultados piores, devido à formação de aresta postiça de corte.

Em Zeng, Belluco e De Chiffre (2001) é mostrado que a emulsão à base de óleo vegetal obteve menores valores de rugosidade, sendo que os fluidos de base mineral e sintética tiveram maior variação dos resultados.

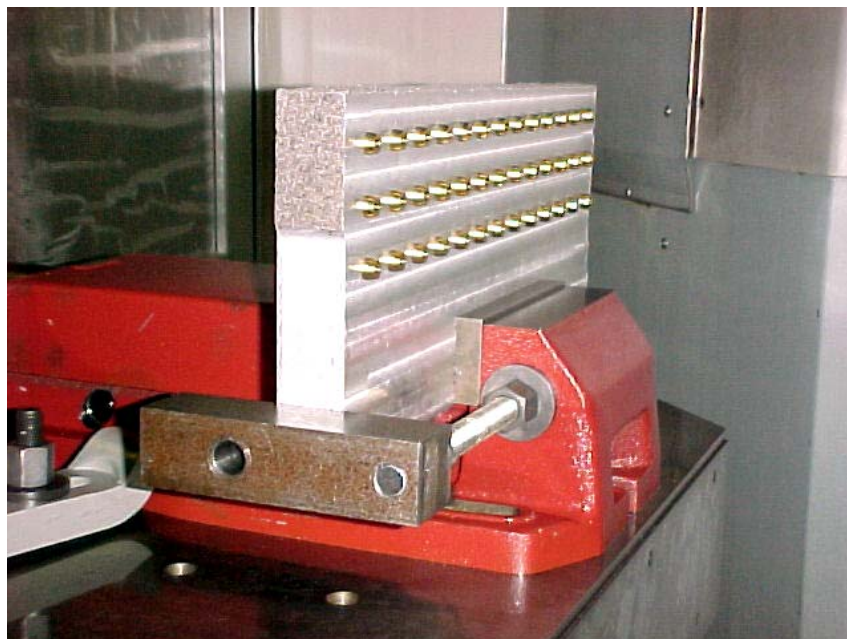
De uma forma geral, os fluidos de corte apresentam comportamentos distintos em um ensaio, sendo que as variáveis de processo como máquina, ferramenta, material da peça, condição do pré-furo e os parâmetros de corte tem grande influência no resultado final do ensaio, o que também dificulta a sua repetibilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

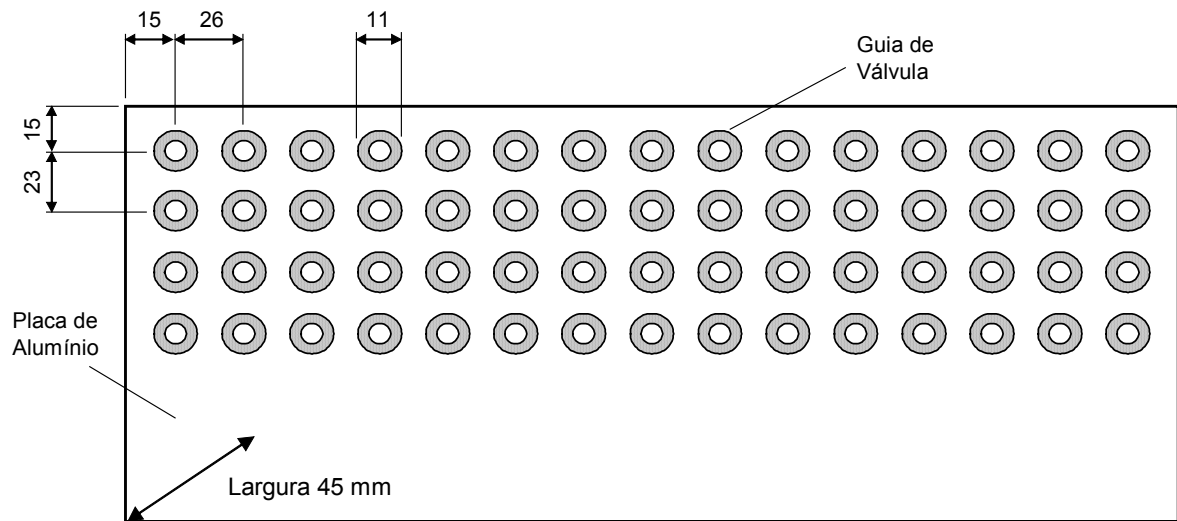
Partiu-se de duas placas brutas de uma liga de AlSi com cerca de 50 mm de espessura, 450 mm de comprimento e 200 mm de altura. As placas tiveram suas faces e laterais fresadas, garantindo o esquadro. A máquina-ferramenta continha uma morsa hidráulica de fixação com força de fechamento de 5 ton, na qual sua base é retificada garantindo um apoio preciso na direção y. Para garantir o esquadro na direção x, foi montado um eixo na morsa com um bloco metálico em sua outra extremidade. Na fig. 15 é possível visualizar o corpo de prova montado no dispositivo de fixação da máquina-ferramenta.

FIGURA 15 – CORPO DE PROVA MONTADO



Na fig. 16 pode-se ver o esquema de montagem das guias. Cada ensaio foi replicado quatro vezes sendo que a sequência de alargamento foi distribuída aleatoriamente nas guias prensadas.

FIGURA 16 – ESQUEMA DE MONTAGEM DAS GUIAS DE VÁLVULAS



Após o fresamento das placas, as mesmas foram furadas e alargadas, visando à confecção dos alojamentos das guias de válvula. As ferramentas e os parâmetros utilizados são mostradas no apêndice 2.

Com os alojamentos preparados, as guias de válvula foram lubrificadas e montadas com uma prensa hidráulica manual. A interferência existente para a montagem das guias de válvula é em média 0,060 mm.

A rigidez do corpo de prova fixado na morsa é suficiente para o processo de alargamento utilizado, pois além da reduzida profundidade de corte, Schroeter (1989) e Eckhardt (1993) encontraram valores de momento torçor na ordem de 50 N.cm e força de avanço de 6 N para o alargamento em alumínio. Kress (1974), Schroeter (1989) e Eckhardt (1993) comentam que a utilização de refrigeração interna das ferramentas reduzem significativamente os esforços de corte para alargadores multi e monocortante.

3.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS

3.2.1 Alargador Multicortante em Metal Duro

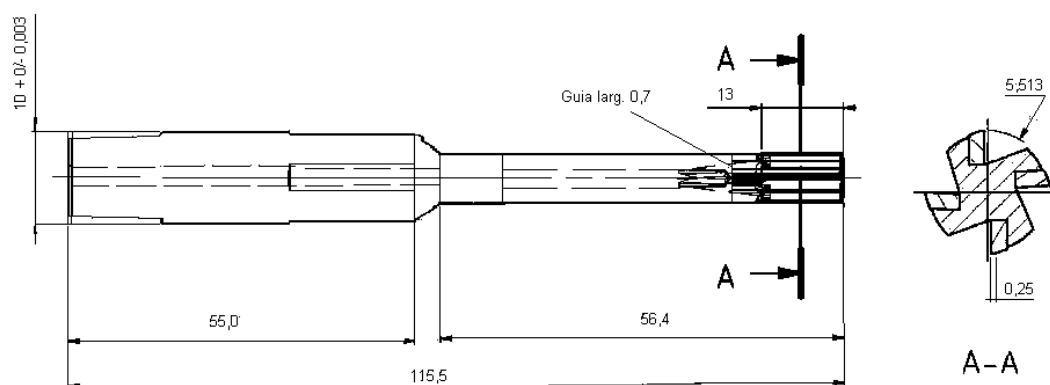
Foi utilizado um alargador do fabricante Hanna Ltda, com quatro arestas de corte e diâmetro de 5,513 mm. Esta ferramenta possui refrigeração interna

distribuída nas quatro arestas de corte que permite melhor acesso do fluido lubrificante na zona de corte e nas guias da ferramenta reduzindo os esforços de corte (Kress 1974, Schroeter 1989 e Eckhardt 1993). O alargador foi construído em aço liga com insertos de metal duro classe K10 soldados. Esta classe de metal duro tem boa tenacidade e é indicado para ligas de cobre (Eckhardt 1993 e Hanna 2003).

O alargador multicortante possui um ângulo de saída neutro, pois a usinagem do latão gera cavacos curtos – arrancados (Beck 1996 e Hanna 2003). Assim, o ângulo de cisalhamento é menor ocorrendo maior deformação e geração do cavaco. Foi escolhido um ângulo de folga de 20° e hélice 0° . A folga de 20° garante que a superfície de folga (flanco) da ferramenta não entra em contato com a superfície usinada do furo. O ângulo de hélice neutro é o recomendado por Stemmer (1995) e Schroeter (1989) para trabalhos de acabamento que necessitem boa precisão dimensional. O ângulo de entrada deve levar em consideração a profundidade de corte e a rugosidade esperada, sendo que Beck (1996), Mapal (2003) e Eckhardt (1993) recomendam 75° .

Na fig. 17 pode ser visto a ferramenta. Nota-se que a mesma possui guias de 0,25 mm de largura nos 8 primeiros milímetros, e guias de 0,70 mm de largura nos outros 8 mm subseqüentes de aresta de corte (a partir do topo da ferramenta).

FIGURA 17 – ALARGADOR CONVENCIONAL EM METAL DURO



A diferença da largura das guias deve-se ao fato de que uma guia mais larga produz uma rugosidade maior, porém as guias inferiores (largura 0,7 mm) apresentam um diâmetro de 5,509 mm, e tem como objetivo guiar a ferramenta na

parte final da usinagem (Kress 1974 e Bezerra et al 2002). Este alargador foi fixo em um cone tipo HSK-63A, que garante boa rigidez da ferramenta.

A inclinação da aresta da corte, no sentido da haste de fixação é de 8 μm . Esta inclinação evita o travamento do alargador, sendo que Ferraresi (1975) recomenda uma inclinação entre 5 e 20 μm para alargadores multicortantes.

3.2.2 Alargador com Único Corte Ajustável em PCD

A outra ferramenta utilizada foi o alargador com única aresta de corte com lâmina intercambiável em PCD do fabricante Mapal GmbH, com refrigeração interna e haste cilíndrica diâmetro de 10 mm que foi montado em um cone tipo HSK-63A. O PCD apresenta elevada resistência ao desgaste e grande afiação da aresta de corte (excelente para pequenas profundidades de corte). Uma característica importante do PCD é a capacidade de não aderir partículas do material usinado na superfície de saída da ferramenta (Weingaertner e Schroeter 2000).

A geometria de corte deste alargador apresenta ângulo de saída neutro e folga 20° (como o alargador multicortante). O ângulo de entrada é duplo com o primeiro ângulo de 75° e o segundo de 3°, sendo que o primeiro ângulo é responsável pela maior remoção de material, e o segundo realiza o acabamento do furo (Eckhardt 1993).

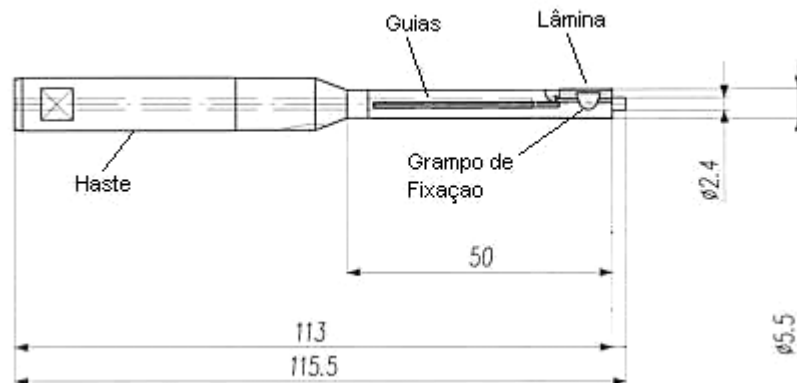
A inclinação da lâmina foi mantido em 15 μm para cada 10 mm de comprimento da aresta de corte, conforme recomendado (Beck 1996 e Mapal 2003). Segundo Kress (1974), o aumento da inclinação da lâmina aumenta a rugosidade da superfície usinada. Contudo, o menor ângulo de entrada (χ) reduz a rugosidade.

O alargador utilizado apresenta três guias com largura de 1,5 mm e dispostas radialmente, sendo que uma está a 90° da lâmina, outra a 180° da lâmina (oposta) e a 300° (na seqüência do giro) da lâmina. As guias são de cermet e foram brasadas no corpo de metal pesado do corpo da ferramenta. O cermet é um material que tem menor aderência de material da peça que o metal duro, e tem menor custo que o PCD (Weinert et al 1998).

O diâmetro formado pelas guias tem 5,506 mm e a ferramenta foi regulada com diâmetro de 5,521 mm, formando uma folga de 15 μm entre a guia e a lâmina

de corte. Esta folga está conforme recomendado por Beck (1996) e Seco (2002), pois com uma folga muito pequena pode ocorrer a aderência de material da peça nas guias da ferramenta monocortante. Na fig. 18 pode ser analisada a ferramenta.

FIGURA 18 – ALARGADOR COM ÚNICA ARESTA DE CORTE



Ambas ferramentas possibilitam a regulagem do erro de batimento radial e axial conforme o eixo da máquina-ferramenta.

3.3 PARÂMETROS DE USINAGEM

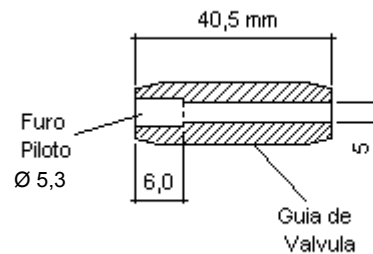
3.3.1 Profundidade de Corte – Usinagem Piloto

A guia de válvula tem um diâmetro interno de 5,0 mm e um erro de concentricidade com relação ao diâmetro externo da peça de no máximo 0,05 mm. Este valor é maior que o recomendado por Kress (1974). Desta forma, a profundidade de corte para o acabamento desta peça é 0,255 mm, sendo um valor relativamente alto para uma ferramenta de diâmetro 5,51 mm (Mapal 2003 e Beck 1996). Contudo, os ângulos de entrada escolhidos para as ferramentas já citadas são para a usinagem desta profundidade de corte (Hanna 2003, Mapal 2003 e Beck 1996).

Kress (1974) sugere a necessidade da utilização de guia externa à ferramenta (como uma bucha-guia para o alargador), que garantiria o melhor posicionamento do alargador bem como evitar desvios de trajetória durante o alargamento. Como a máquina utilizada neste trabalho não dispõe deste dispositivo, um pré-alargamento serviria de guia para o alargamento final. Este furo piloto foi

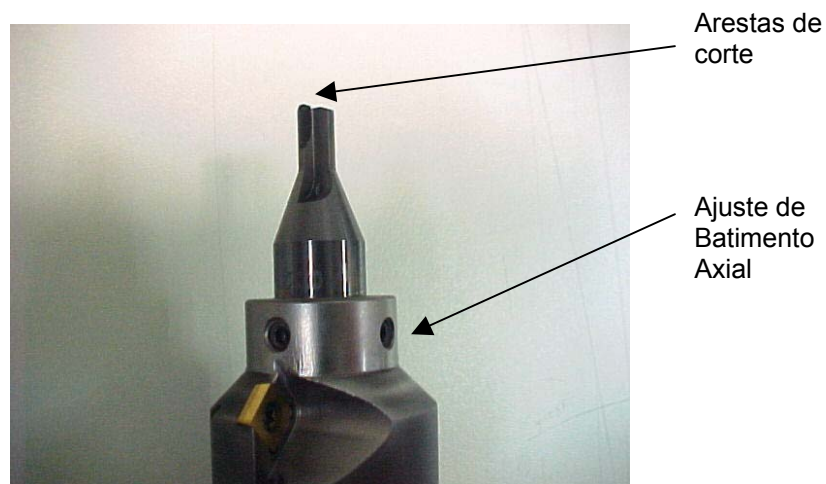
executado com uma ferramenta Mapal com duas arestas de corte em PCD. A ferramenta piloto realizou um furo de 5,3 mm de diâmetro em 6 mm de comprimento (fig. 19). O pré-teste realizado apresentou pequena variação do desvio de forma ($1\text{ }\mu\text{m}$) com a variação da profundidade de corte de 0,06 e 0,25 mm, sendo que a maior profundidade apresentou melhores resultados. A rugosidade e a variação do diâmetro apresentaram valores semelhantes para as duas profundidades de corte utilizadas no pré-teste. Desta forma, não variou-se a profundidade de corte.

FIGURA 19 – ESQUEMA DO FURO PILOTO (CORTE LONGITUDINAL)



Foi utilizado uma velocidade de corte de 60 m/min e avanço de 0,075 mm/volta. A ferramenta tem refrigeração interna e possibilidade de ajuste do erro de batimento (axial). A fig. 20 mostra a foto da ferramenta utilizada.

FIGURA 20 – ALARGADOR DO FURO PILOTO



Após a usinagem do piloto foi realizada a usinagem de acabamento com o diâmetro final (alargadores mono e multicortantes).

3.3.2 Velocidade de Corte

Em Hanna (2003) e Mapal (2003) é sugerido uma velocidade de corte de até 200 m/min para o latão; e em Beck (1996) e Kennametal (2003) é recomendado uma velocidade entre 50 e 100 m/min, também para o latão. As velocidades de corte citadas foram usadas em ferramentas de PCD com alargadores com única aresta de corte. Para os alargadores convencionais em metal duro, Mapal (2003) recomenda uma velocidade de 80 m/min. A alimentação interna de fluido de corte nos alargadores permite aumento da velocidade de corte sem prejudicar o acabamento do furo, devido a maior lubrificação das guias e arestas de corte (Weingaertner e Schroeter 2000, Eckhardt 1993 e Kress 1974).

O pré-teste realizado com ferramenta monocortante em PCD apresentou igualdade dos resultados da rugosidade média e desvios de forma com a variação da velocidade de corte de 90 até 140 m/min.

Desta forma, os ensaios foram realizados sem a variação da velocidade de corte, fixando-a em 80 m/min a uma velocidade de rotação de 4622 rpm. O valor utilizado é aproximadamente o dobro da velocidade usada por Eckhardt (1993) e Schroeter (1989) em seus experimentos em ligas de alumínio com alargadores com única aresta de corte com lâminas de metal duro.

Não foi variada a velocidade de corte nos experimentos, pois Eckhardt (1993) e Schroeter (1989) relatam no que alargamento com ferramentas monocortantes em ligas de alumínio, não verificaram significância estatística dos resultados dos esforços de corte, desvios de forma e sobremedida do diâmetro do furo com a variação da velocidade de corte.

3.3.3 Avanço

O avanço por dente foi variado em dois níveis: 0,07 e 0,14 mm/z. Desta forma, a velocidade de avanço dos dois alargadores ficou da seguinte maneira:

- Única aresta de corte em PCD: 324 mm/min e 647 mm/min;
- Quatro arestas de corte em metal duro: 1294 mm/min e 2589 mm/min.

No pré-teste foi encontrado grande diferença estatística da rugosidade com a variação do avanço (de 0,07 a 0,13 mm/volta) para o alargador monocortante em PCD. Entretanto, para os desvios de forma os resultados apresentaram menor variação.

Para ligas de alumínio e utilizando alargadores com única aresta de corte intercambiável em metal duro, Schroeter (1989) variou o avanço por dente entre 0,094 e 0,50 mm/z, Eckhardt (1993) e variou entre 0,315 e 0,50 mm/z. Ambos pesquisadores não encontraram diferenças significativas entre os valores dos desvios de forma. Nos ensaios de Schroeter (1989) também não houve diferença da rugosidade com a variação do avanço.

Em Beck (1996), é sugerido um avanço entre 0,1 e 0,3 mm/z, enquanto Mapal (2003) recomenda valores entre 0,08 e 0,20 mm/z para a usinagem de latão. Os dados citados são para ferramentas em PCD e única aresta de corte. Para os alargadores convencionais em metal duro, Mapal (2003) recomenda avanços por dente entre 0,05 e 0,20 mm/z, e Kennametal (2003) 0,12 a 0,15 mm/z. Os valores de avanço variam com a geometria do alargador.

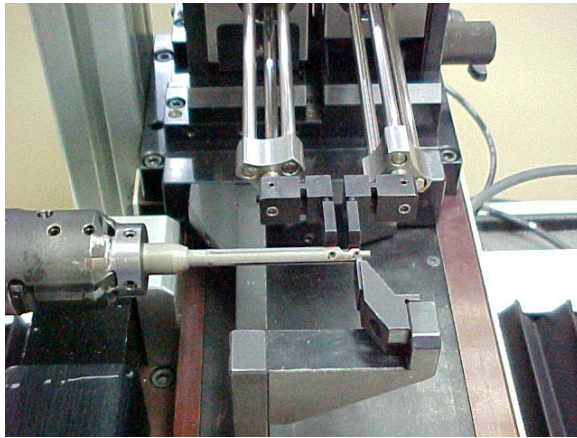
Conforme Kress (1974), Ferraresi (1995) e Stemmer (1995) o aumento do avanço aumenta a rugosidade da superfície usinada, sendo que para o alargamento a inclinação da aresta de corte (conicidade) e o ângulo de entrada (com menor significância) também influenciam na rugosidade.

3.4 EQUIPAMENTO PARA AJUSTE DOS ALARGADORES

3.4.1 Equipamento de Regulagem da Aresta de Corte

Para a regulagem das ferramentas foi utilizado um banco de regulagem Mapal modelo UNISSET-H ano 2000. Este equipamento tem uma precisão de $\pm 1 \mu\text{m}$ e é composto por dois apalpadores com ponta de rubi. Na fig. 21 pode ser visto o sistema de medição.

FIGURA 21 – FOTO (a) MOSTRA DETALHE DA REGULAGEM; E (b) VISÃO GERAL DO EQUIPAMENTO DE *PRE-SET*



(a)



(b)

Após ajuste da aresta de corte, as ferramentas foram centradas na máquina, visando minimizar o erro de batimento existente. Esta regulagem é feita através de quatro parafusos dispostos paralelamente ao eixo da ferramenta (na flange de conexão ao adaptador *HSK*), que permitem a centragem da ponta da ferramenta radialmente ao fuso da máquina e mais quatro, dispostos perpendicularmente ao eixo da ferramenta (cruz), que permitem o ajuste axial (fig. 19). Foi utilizado uma base magnética de fixação com um relógio comparador com divisão de $1\ \mu\text{m}$. O valor de erro de batimento mantido nas ferramentas foi de $2\ \mu\text{m}$ na direção *x*.

3.4.2 Equipamento de Balanceamento

Os dois alargadores utilizados no ensaio foram previamente balanceados no equipamento modelo Tooldyne da Schenck. Ambas foram balanceadas com qualidade G2,5 para trabalhar a uma velocidade de rotação de 10000 rpm.

3.4.3 Microscópio Ótico

Para a visualização de trincas, lascas, aresta postiça de corte ou desgaste das ferramentas, utilizou-se um microscópio ótico da marca Carl Zeiss modelo Axiotec com aumento de até 50 vezes, e câmera fotográfica digital acoplada do fabricante Sony modelo Cyber-shot DSC-S75 com resolução de 3,3 Mpixels.

3.5 FLUIDOS DE CORTE UTILIZADOS

Foram utilizados dois tipos de micro-emulsões do fabricante Quaker Chemical S/A, sendo ambas semi-sintéticas. A parte mineral destas emulsões é composta por óleo naftênico. Ambas têm aditivos de extrema pressão a base de fósforo, biocida, anti-espumante e anti-corrosivo (hidroxietilaminas). Os aditivos EP aumentam a lubricidade dos fluidos, e é comum no alargamento (Sales 1999). O fluido semi-sintético *A* apresenta entre 20 e 30% de óleo mineral e o restante ésteres (parte lubrificante), formando um tamanho médio de miscela de 2 μm (micro miscela). O fluido semi-sintético *B* apresenta entre 5 e 10% de óleo mineral e o restante são ésteres. A emulsão é formada por material lubrificante (óleo mineral + compostos sintéticos), aditivos e água.

A aplicação do fluido de corte foi direcionada à aresta de corte pela parte interna das ferramentas, sendo aplicada a uma pressão de 20 bar (especificado em Beck 1996 e Mapal 2003). O fabricante recomenda a utilização de uma concentração de 12% de lubrificante na emulsão. Com base neste dado, os ensaios tiveram a seguinte variação:

- Emulsão Semi-sintética A: 6,5%, 11,8% e 14,3%;
- Emulsão Semi-sintética B: 6,9%, 12,8% e 16,1%.

A maior concentração de material lubrificante na emulsão melhora a lubrificação entre as guias com a parede do furo e da aresta de corte com o cavaco (Runge e Duarte 1989 e JP Industrie 1998). Assim, houve a necessidade de variar a concentração de material lubrificante das emulsões.

3.5.1 Método para Verificação da Concentração

O método utilizado para a verificação da concentração das emulsões foi a quebra ácida. Este processo avalia melhor que o refratômetro a concentração de óleo de uma emulsão. Um inconveniente é a presença de outros tipos de óleos na emulsão, que podem alterar o resultado real. Porém, a quantidade usual destes óleos para as emulsões é de 1% no máximo.

Este método consiste na colocação de 100 ml de emulsão em um frasco Babcock (Runge e Duarte 1989). Este frasco tem a parte inferior cônica com capacidade de 100 ml e a parte superior cilíndrica com capacidade de 10 ml e graduado com intervalos de 1 ml. Após a colocação da emulsão, aplica-se 10 ml de ácido clorídrico a 20%, agita-se a mistura mantendo-a em repouso por aproximadamente 2 horas. Com o passar do tempo, o óleo se separa da água se concentrando na parte superior do frasco, que com a graduação é possível calcular o percentual de óleo (Runge e Duarte 1989).

3.5.2 Temperatura do Fluido

O fluido de corte é transferido à máquina-ferramenta por uma central de abastecimento com capacidade para 3000 l de fluido e filtração de 50 μm . A emulsão é agitada por 5 horas para melhor homogeneidade do tamanho e distribuição das mistelas da emulsão. Com este procedimento houve o aquecimento do fluido devido o seu bombeamento. A temperatura de trabalho foi definida em 34 °C com tolerância de ± 1 °C. O especificado pelo fornecedor da emulsão é 25 °C, mas como não havia sistema de controle de temperatura do fluido, aguardou-se a redução da temperatura até a tolerância do ensaio.

Para a medição da temperatura do óleo, utilizou-se um termômetro infravermelho da marca Raytek modelo Raynger MX2.

3.6 MATERIAL ENSAIADO

O material submetido ao ensaio é uma liga de cobre (latão de alta resistência) CuZn36Mn3Al2SiPb que sofreu tratamento de estabilização (1 hora a 400 °C). Este material é utilizado no motores de combustão interna, como guias de válvula e anéis de sincronização.

3.6.1 Composição e Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas desta liga de cobre é a seguinte:

Resistência à Tração – 600 a 800 MPa

Tensão de Escoamento – 400 a 650 MPa

Alongamento – 10%

Dureza Brinell – 165 a 220 HB

Na tabela 2 pode-se analisar a composição química do material ensaiado.

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL DA GUIA DE VÁLVULA

ELEMENTO	Cu	Zn	Pb	Fe	Si	Al	Mn
%	57 a 60	Balanço	0,3 a 0,7	0 a 0,25	0,6 a 0,9	1,5 a 2,0	2,0 a 4,0

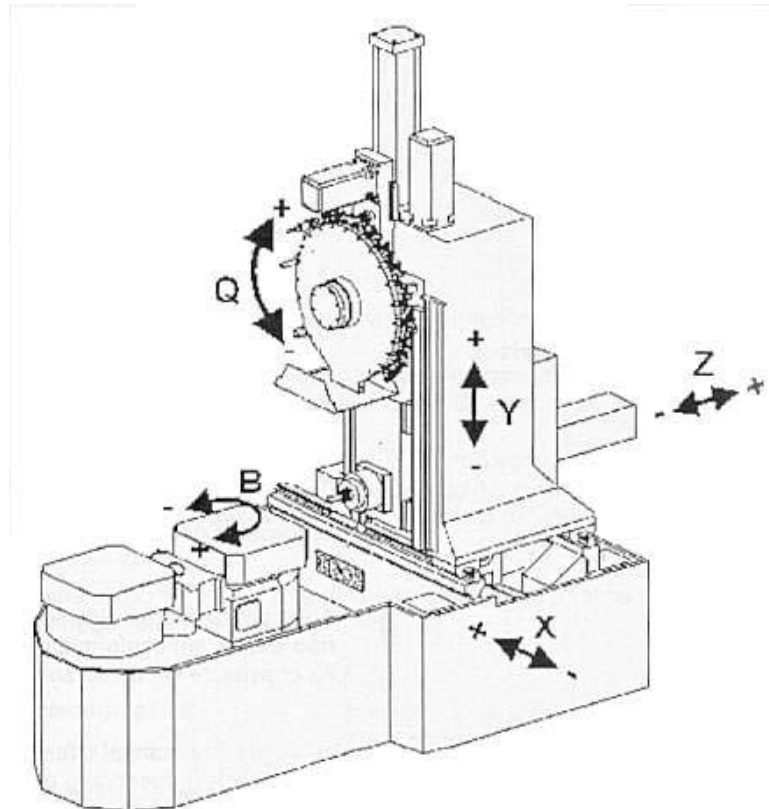
FONTE: AFNOR.

3.7 MÁQUINA-FERRAMENTA

O equipamento utilizado nos ensaios foi um centro de usinagem Grob BZ600, com máxima velocidade de rotação de 12000 rpm, e velocidade máxima de avanço no eixo z de 70 m/min e nos eixos x e y uma velocidade de 60 m/min. A aceleração do eixo z é 14 m/s^2 , e nos eixos x e y é 9 m/s^2 . O curso do eixo z é 630 mm, do eixo y é 700 mm e do eixo x é 800 mm. A potência da máquina-ferramenta é de 60 kW e o máximo torque é 200 Nm. A máxima pressão de refrigeração, interna ao fuso, é de 60 bar, com filtragem de $30 \mu\text{m}$ do fluido de corte. A precisão média de posicionamento dos eixos é de $5 \mu\text{m}$. O comando numérico computadorizado utilizado foi Siemens Sinumerik 840D.

Na fig. 22 é possível visualizar os eixos de movimentação da máquina-ferramenta, onde o eixo Q refere-se ao magazine de ferramentas e o eixo B ao giro da mesa.

FIGURA 22 – ESQUEMA DOS EIXOS DA MÁQUINA-FERRAMENTA



FONTE: GROB. Treinamento a clientes - operação e CNC. Comando siemens 840D, 2000.

3.8 VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS

3.8.1 Máquina Tridimensional

A máquina de medição por coordenadas utilizada foi a Carl Zeiss, modelo UPMC 850 Standard e foi utilizada para a medição dos diâmetros, cilindrícios e circularidades dos furos. Este equipamento apresenta uma resolução de $0,2 \mu\text{m}$ e incerteza de medição descrita pela equação $0,9 + L/500 \mu\text{m}$, onde L é o comprimento medido. Desta forma, para a guia de válvula com apalpagem de 28 mm, sendo o comprimento total da peça de 40,5 mm menos 12 mm de distância entre as bordas (6 mm de cada lado da guia), temos uma incerteza de medição de $0,96 \mu\text{m}$.

A guia de válvula foi medida em três posições ao longo de seu comprimento, sendo a 6 mm da borda, 20 mm (meio da guia) e 34 mm. Cada seção foi definida por quatro pontos de apalpagem, onde foram medidos o diâmetro e circularidade em

cada posição da guia de válvula. O valor de cilindridade foi obtido através das medições de circularidade em cada posição.

As seções escolhidas para as medições são sobre a usinagem na profundidade de corte de 0,255 mm.

3.8.2 Rugosímetro

O rugosímetro utilizado foi o Perthometer S2 da Mahr GmbH, com apalpador Mahr MWF-250 com raio de 2 μm . Este rugosímetro permite realizar medições segundo a norma ISO (DIN), ASME e JIS. Na verificação da rugosidade das guias de válvulas ensaiadas foi utilizado a norma ISO com curso de medição 4 mm (0,8*5) – cut off, pois eram esperados resultados de rugosidade média entre 0,1 e 2 μm .

A rugosidade foi medida em dois pontos de cada guia de válvula nos parâmetros média aritmética da rugosidade (R_a), profundidade (R_z) e altura total do perfil (R_t).

As medições para a verificação da qualidade dos furos usinados foram realizadas em ambiente com temperatura e umidade do ar controlada, além de isolamento de vibrações externas.

3.9 METODOLOGIA EMPREGADA

Foi realizada a combinação das variáveis do processo visando detectar a relação com os desvios de forma e de acabamento do furo alargado. Fez-se um arranjo experimental 2^2 combinando os dois tipos de alargadores e os dois tipos de fluidos de corte, que resultou em quatro combinações. Cada combinação teve a variação do avanço por aresta em dois níveis (para o fator alargador), e a concentração de óleo em três níveis (para o fator fluido de corte). Desta forma, a combinação dos níveis de fatores avanço por aresta de corte e concentração de óleo geraram seis experimentos (2 x 3). Assim, foram executados seis ensaios para cada uma das quatro combinações dos fatores alargador e fluido de corte, resultando em um total de 24 ensaios.

Para maior confiabilidade dos resultados e melhor análise estatística, os ensaios foram replicados quatro vezes, totalizando 96 furos alargados. Na fig. 23 possível ver o planejamento experimental.

FIGURA 23 – TABELAS DO PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Fator	Nº	Níveis
Fluido de Corte	1	Fluido de Corte A
	2	Fluido de Corte B
Alargador	1	Monocortante em PCD
	2	Multicortante em MD
Avanço (f_z)	1	0,07 mm/z
	2	0,14 mm/z
Concentração	1	6%
	2	12%
	3	16%

Arranjo 2²

<i>Ensaio</i>	<i>Alargador</i>	<i>Fluido</i>
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Arranjo 2 x 3

<i>Ensaio</i>	<i>Conc. (%)</i>	<i>f_z (mm/z)</i>
1	1	1
2	2	1
3	3	1
4	1	2
5	2	2
6	3	2

Os demais parâmetros de processo como velocidade de corte, profundidade de corte, refrigeração interna da ferramenta e geometria da aresta de corte permaneceram fixos. Segundo a revisão da literatura já apresentada, os parâmetros acima citados estão em uma condição otimizada para a execução de furos de precisão.

3.9.1 Análise Estatística: ANOVA

Os resultados da rugosidade, desvios de forma e variação do diâmetro foram analisados com o auxílio do *software* estatístico Statgraphics 5.0 Plus¹. Construiu-se a tabela da ANOVA (análise da variância) para identificar qual variável apresentou diferença estatisticamente significativa. Utilizou-se o teste de comparação múltipla LSD (*Least Significant Difference*) com confiança de 95,0% para analisar quais médias são estatisticamente diferentes.

A análise da variância é utilizada para comparar dois ou mais grupos. Utiliza-se a comparação das variâncias para verificar a variação de uma população normal. Aplica-se a análise da variância para o teste da hipótese nula (todas as médias são iguais), o que pode identificar pelo menos uma das médias diferentes das demais. A ANOVA apresenta-se como um quadro, sendo que a análise de significância das médias é realizada sobre a estatística F (relação dos quadrados médios – dos tratamentos e residual) e sobre o fator P . Quanto maior o fator P mais próximo da hipótese nula é o experimento. Desta forma, adota-se o fator P menor que 5% para identificar médias com diferença estatisticamente significativa entre os fatores.

A aplicação da análise da variância depende da normalidade e homogeneidade das amostras.

A ANOVA identifica a desigualdade das médias, porém não identifica qual ou quais médias são diferentes. Assim, é aplicado um teste de comparação múltipla. O teste LSD utiliza a distribuição de probabilidade *t de Student* com 95% de grau de confiança para comparar a diferença das médias (Button 2000).

¹ Utilizado licença de demonstração - site www.statgraphics.com

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a apresentação dos resultados o alargador 1 foi identificado como a ferramenta monocortante em PCD, e o alargador 2 como a ferramenta com quatro arestas de corte em metal duro. A emulsão com 30% de óleo mineral, ésteres e água foi denominado como fluido *A*, e o com 10% de óleo mineral, ésteres e água como fluido *B*.

No apêndice 3 é possível analisar a tabela com todos os resultados encontrados nos ensaios.

4.1 RUGOSIDADE

Na tabela 3 é possível analisar a ANOVA para as rugosidades.

TABELA 3 – TABELA DA ANOVA PARA AS RUGOSIDADES

	Fator	GL	Soma dos Quadrados	Estatística F	Valor P
Ra	Alargador	102	0,073263	18,97	0
	Avanço	102	0,073263	46,44	0
	Fluido	102	0,073263	15,95	0,0001
	Concentração	102	0,073263	0,38	0,6844
Rz	Alargador	102	16,959	22,65	0
	Avanço	102	16,959	20,87	0
	Fluido	102	16,959	12,18	0,0007
	Concentração	102	16,959	0,05	0,9489
Rt	Alargador	102	59,888	37,09	0
	Avanço	102	59,888	39,78	0
	Fluido	102	59,888	8,83	0,0037
	Concentração	102	59,888	0,09	0,9168

Os resultados estatisticamente significativos são os que apresentam o valor de *P* menor que 0,05 (5%).

4.1.1 Influência do Tipo do Alargador

O alargador 1 apresentou pior resultado de Ra, e melhor resultado de Rt e Rz. Porém, os valores de Ra encontrados permaneceram abaixo de $0,15\text{ }\mu\text{m}$, que é um valor relativamente baixo. Os gráficos 1, 2 e 3 mostram os valores médios das rugosidades e a distribuição de probabilidade *t de Student* com 95% de grau de confiança. Em todos os gráficos os indicadores não se sobrepuseram, indicando diferença entre as médias, ou seja, alterando o tipo de alargador alteram-se as rugosidades.

GRÁFICO 1 – MÉDIAS DE Ra (μm) DOS ALARGADORES

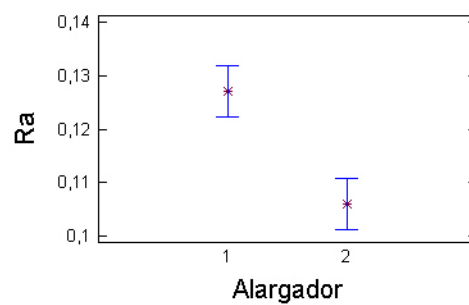


GRÁFICO 2 – MÉDIAS DE Rz (μm) DOS ALARGADORES

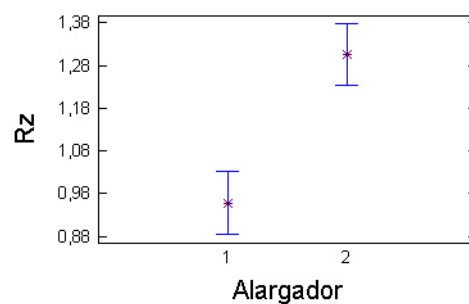
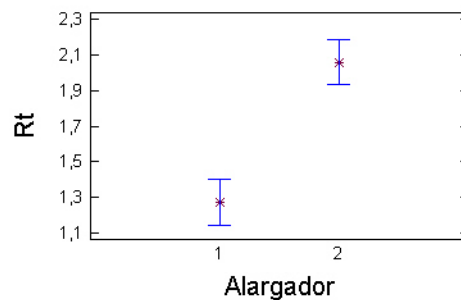


GRÁFICO 3 – MÉDIAS DE R_t (μm) DOS ALARGADORES

A rugosidade média R_a do alargador 2 foi em média 15% melhor que o alargador 1. Esta diferença se dá pela maior largura das guias (Bezerra et al 2001) da ferramenta em PCD (alargador 1) e maior inclinação da aresta de corte na direção da haste da ferramenta – conicidade (Schroeter 1989). Entretanto, o alargador 1 apresentou melhores resultados da altura média (R_z) e máxima das irregularidades (R_t). Isto ocorreu pela utilização da lâmina de corte em PCD que é extremamente afiada, garantindo um alargamento mais uniforme mantendo a ferramenta isenta de aresta postiça de corte. Na figura 24, é possível visualizar os alargadores utilizados e na figura 25 as superfícies de saída das arestas de corte após os ensaios.

FIGURA 24 – ALARGADOR MULTICORTANTE EM METAL DURO (a), E ALARGADOR MONOCORTANTE EM PCD (b)



(a)



(b)

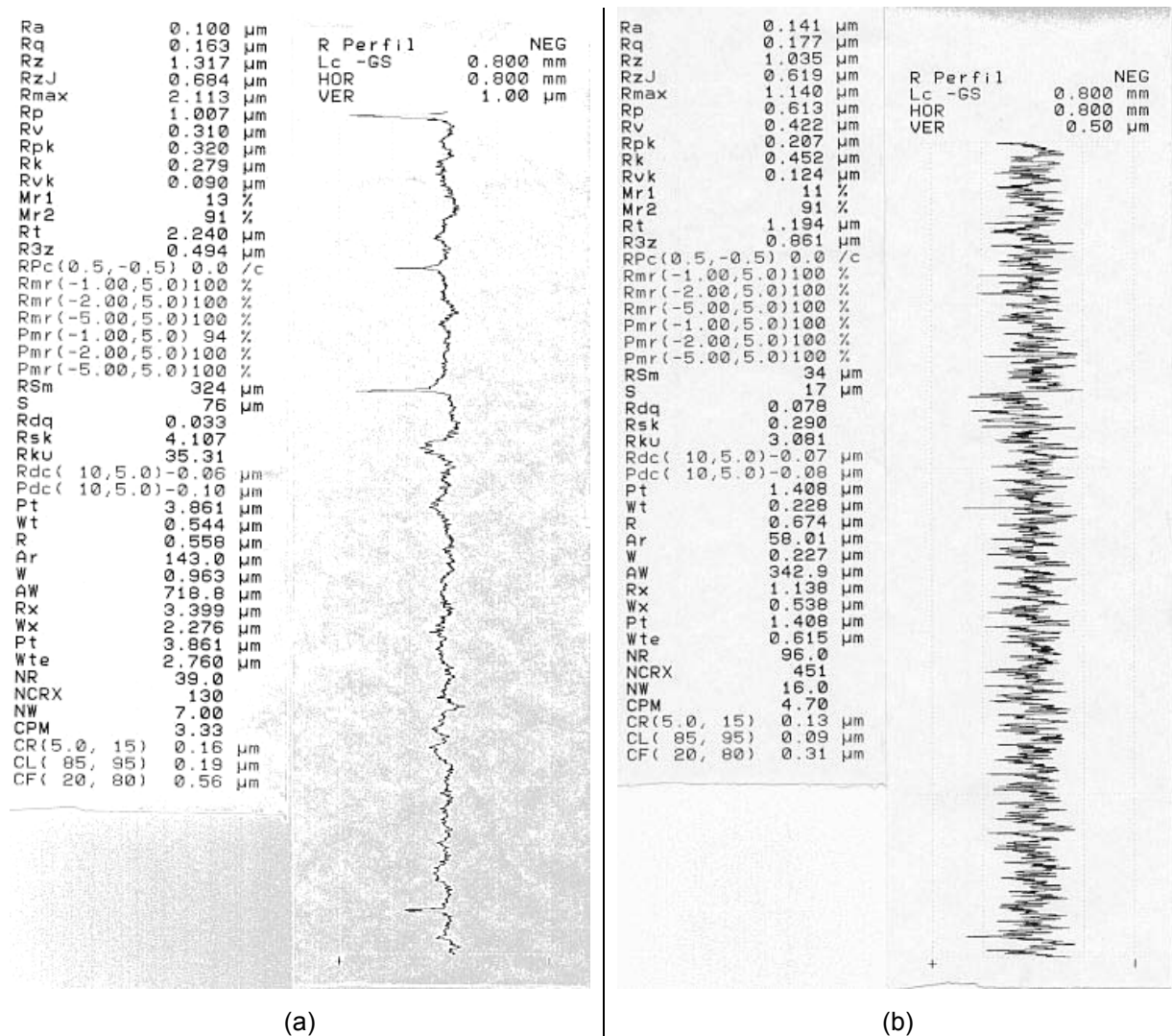
FIGURA 25 – SUPERFÍCIE DE SAÍDA DO ALARGADOR EM METAL DURO (a) E DO ALARGADOR EM PCD (b)²



Percebe-se na fig. 25 o pequeno acúmulo de latão na quina da ferramenta de metal duro (b). Na fig. 26 encontram-se os resultados e os perfis de rugosidade para os dois alargadores.

² Fotos ampliadas 10x.

FIGURA 26 – RESULTADOS E PERFIS DE RUGOSIDADE DO ALARGADOR MULTICORTANTE (a), E DO ALARGADOR MONOCORTANTE (b)



NOTA: USINAGEM COM FLUIDO A (6,5%) E AVANÇO DE 0,14 mm/z.

O resultado mostra a tendência citada acima: alargador 2 em MD com menor Ra e maior Rz e Rt. Na fig. 26 o perfil para o alargador 2 (a) está na escala de 1 μm, enquanto o alargador 1 (b) apresenta o perfil em 0,5 μm. O alargador 2 apresenta maiores picos que elevam os resultados de Rz e Rt. Este resultado pode ter sido decorrência de partículas de latão na superfície dos furos. Para o alargador 1 o perfil mostrou-se mais uniforme, porém com maior quantidade de picos e vales menores.

4.1.2 Influência do Avanço

Com o aumento do avanço a rugosidade piorou consideravelmente. Em Stemmer (1995), é demonstrada a grande influência do avanço sobre o acabamento superficial. Bezerra et al (2001) e Eckhardt (1993), também encontraram a mesma relação entre avanço e rugosidade aqui demonstrada. Entretanto, dependendo da geometria do alargador pode-se não encontrar diferenças significativas de rugosidade com a variação do avanço. Nos ensaios de Schroeter (1989), o avanço não apresentou influência sobre a rugosidade, pois os ângulos de entrada (χ) da ferramenta eram pequenos, mantendo a entrada e o corte mais suaves. Nos gráficos 4, 5 e 6 pode-se observar a influência do avanço por aresta de corte sobre as rugosidades Ra, Rz e Rt.

GRÁFICO 4 – MÉDIAS DE Ra (μm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO

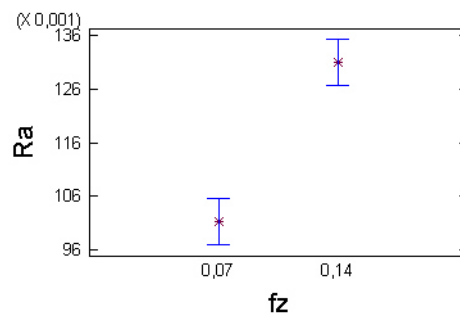


GRÁFICO 5 – MÉDIAS DE Rz (μm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO

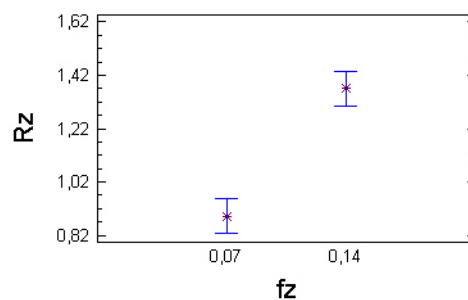
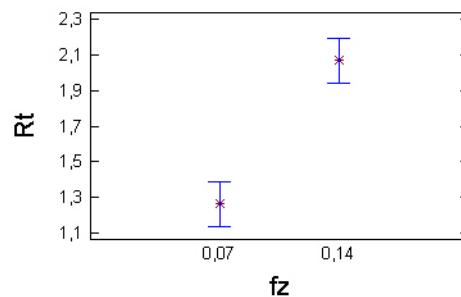


GRÁFICO 6 – MÉDIAS DE R_t (μm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO

Muitos autores apresentam a relação da rugosidade teórica diretamente proporcional ao avanço e inversamente ao raio de ponta de uma ferramenta de tornear ($R = F^2/8r$). Para o alargamento Kress (1974) mostra que a rugosidade teórica é diretamente proporcional ao avanço, inclinação da aresta (conicidade) e espessura do cavaco e inversamente proporcional ao ângulo de entrada (χ). Assim, os resultados estão conforme encontrado na literatura: o aumento do avanço aumenta a rugosidade da superfície usinada.

4.1.3 Influência do Tipo de Fluido de Corte

O tipo de fluido de corte utilizado apresentou, como já mostrado na tabela 3, diferença estatisticamente significativa para R_a , R_z e R_t . Nos gráficos 7, 8 e 9 podem ser visualizados os resultados, onde o fluido A apresentou menores valores de rugosidade. Os resultados levam em consideração a média de todas as concentrações para cada fluido.

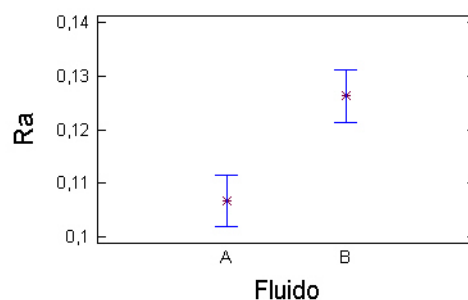
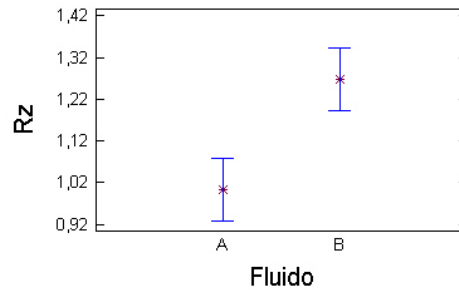
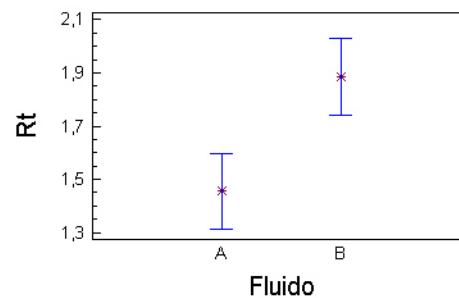
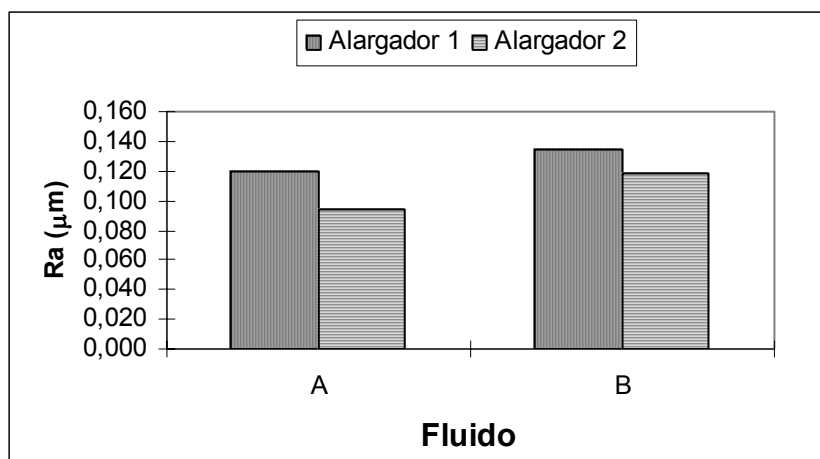
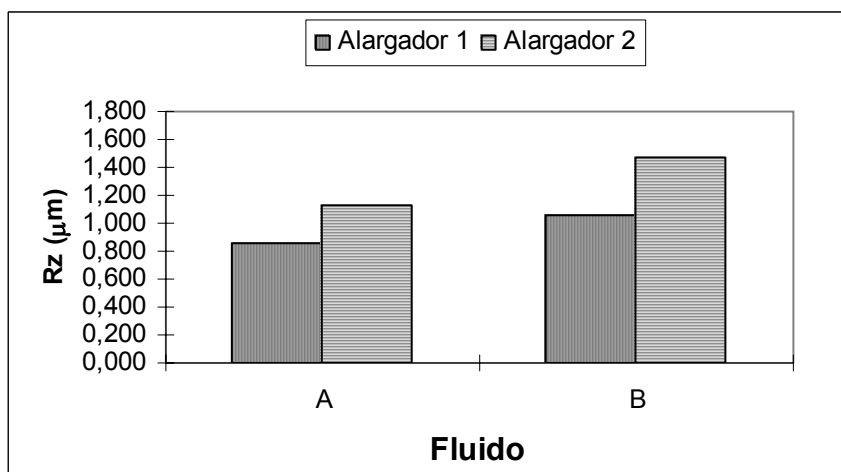
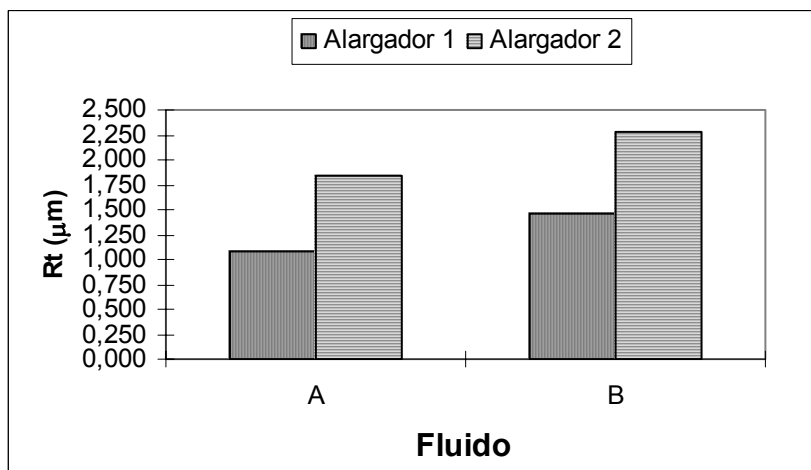
GRÁFICO 7 – MÉDIAS DE R_a (μm) DOS FLUIDOS DE CORTE

GRÁFICO 8 – MÉDIAS DE R_z (μm) DOS FLUIDOS DE CORTEGRÁFICO 9 – MÉDIAS DE R_t (μm) DOS FLUIDOS DE CORTE

Estes resultados mostram a maior capacidade de lubrificação do fluido A. O fluido A apresenta maior quantidade de óleo mineral em sua composição e menor tamanho de miscela, garantindo a maior lubricidade.

O alargador 1 com o fluido A apresentou resultado de R_a semelhante ao alargador 2 com o fluido B. O fluido A obteve melhores resultados de acabamento superficial do furo. Nos gráficos 10, 11 e 12 são comparados os resultados das rugosidades dos tipos de alargadores com os fluidos de corte utilizados.

GRÁFICO 10 – MÉDIAS DE R_a (μm) PARA O TIPO DE ALARGADOR E OS FLUIDOS DE CORTEGRÁFICO 11 – MÉDIAS DE R_z (μm) PARA O TIPO DE ALARGADOR E OS FLUIDOS DE CORTEGRÁFICO 12 – MÉDIAS DE R_t (μm) PARA O TIPO DE ALARGADOR E OS FLUIDOS DE CORTE

4.1.4 Influência do Concentração do Fluido de Corte

Os resultados de rugosidade com a variação da concentração do lubrificante nos fluidos de corte não apresentaram diferença estatística entre as médias (como mostra a tabela 3). Nos gráficos 13 e 14 é possível verificar a influência da concentração dos dois fluidos de corte nas rugosidades Ra e Rt, Rz.

GRÁFICO 13 – MÉDIAS DE Ra (μm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE

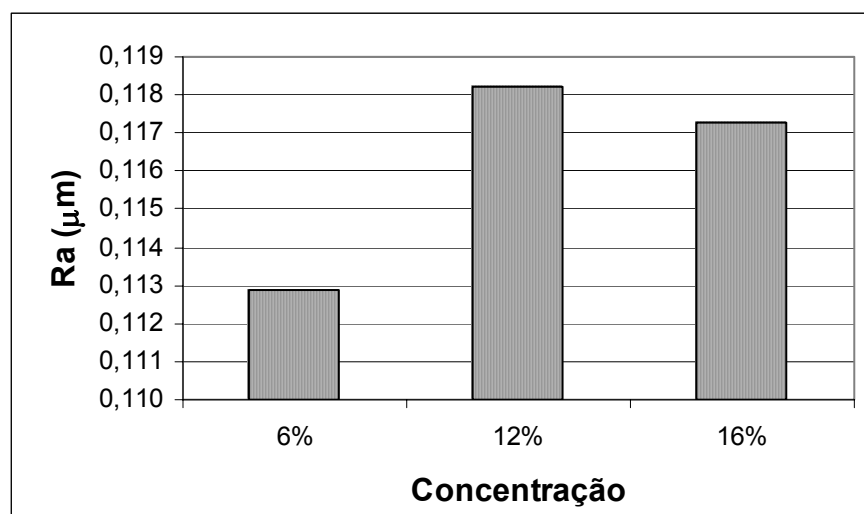
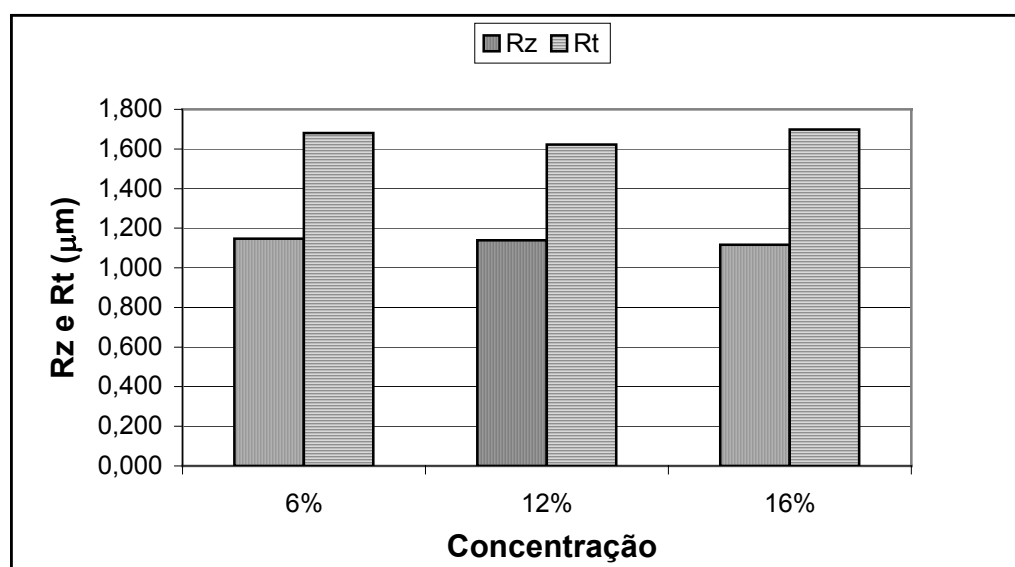
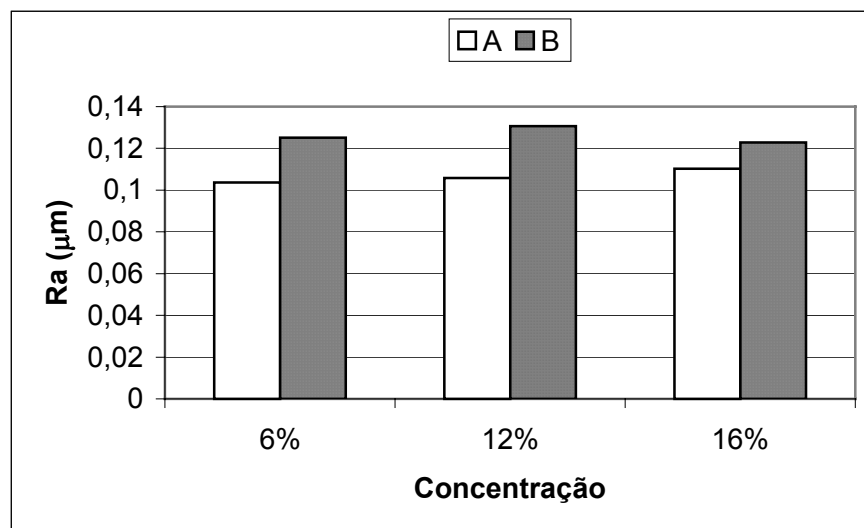


GRÁFICO 14 – MÉDIAS DE Rz E Rt (μm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE



Como já comentado, o fluido *A* apresentou melhor performance de rugosidade. As rugosidades mais altas foram com maior concentração. O fluido *B* mostrou ser mais eficiente com uma concentração de 16,1% (gráficos apresentam 16%), o que era esperado, pois se aumenta a lubricidade; aproximando-se ao desempenho do fluido *A* (gráfico 15). Assim, é possível dizer que o fluido *A* pode trabalhar com uma concentração reduzida sem influenciar no acabamento superficial do furo; contudo o fluido *B* necessita de maior quantidade de lubrificante. Isto implica em reduzir o consumo de óleo.

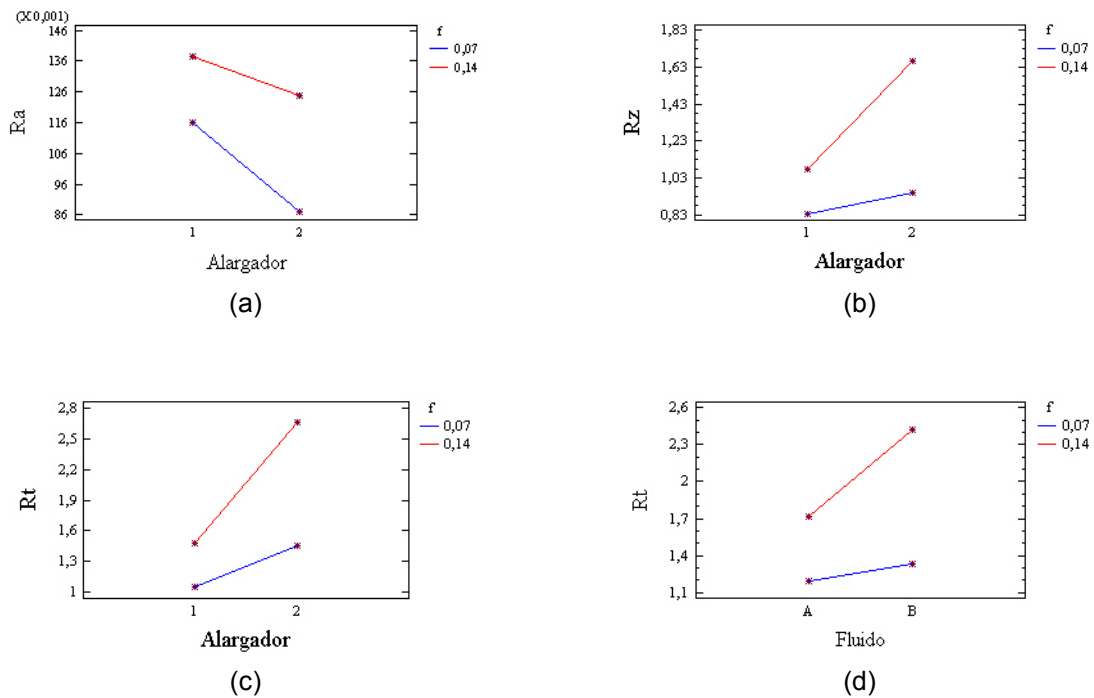
GRÁFICO 15 – MÉDIAS DE R_a (μm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO PARA CADA FLUIDO DE CORTE



4.1.5 Interações Significativas às Rugosidades

Realizando interações entre as variáveis de processo apresentadas, foram encontrados resultados significativos entre os alargadores e os avanços (para as três rugosidades) e entre os fluidos de corte e os avanços para a rugosidade total R_t . No anexo 1 é possível analisar todas as tabelas da ANOVA para as interações. Na fig. 27 são apresentados os gráficos das interações para as rugosidades.

FIGURA 27 – GRÁFICOS DAS INTERAÇÕES ENTRE O TIPO DE ALARGADOR E AVANÇO (a,b,c) E TIPO DE FLUIDO DE CÔRTE E AVANÇO (d) PARA AS RUGOSIDADES



Os gráficos da fig. 27 mostram que o menor avanço resulta em menor rugosidade em todas as interações. O alargador 1 apresentou menor variação das médias das rugosidades com a alteração do avanço; e o fluido A resultou em menores rugosidades decorrente da sua maior capacidade de lubrificação.

4.2 DESVIOS DE FORMA

Na tabela 4 é possível analisar a ANOVA para os desvios de forma (circularidade e cilindridade).

TABELA 4 – TABELA DA ANOVA PARA OS DESVIOS DE FORMA

continua

Erros de Forma	Fator	GL	Soma dos Quadrados	Estatística F	Valor P
Circularidade	Alargador	102	0,0000115	3,96	0,0494
	Avanço	102	0,0000115	1,91	0,1705
	Fluido	102	0,0000115	0	0,9806

TABELA 4 – TABELA DA ANOVA PARA OS DESVIOS DE FORMA

Erros de Forma	Fator	GL	Soma dos Quadrados	Estatística F	conclusão
					Valor P
Cilindricidade	Concentração	102	0,0000115	2,69	0,0727
	Alargador	102	0,001089	119,46	0
	Avanço	102	0,001089	6,05	0,0156
	Fluido	102	0,001089	1,86	0,1762
	Concentração	102	0,001089	0,03	0,9676

4.2.1 Influência do Tipo do Alargador

Os resultados de circularidade foram calculados pela média das três medições realizadas no furo, sendo no início, meio e fim da guia de válvula usinada. Os valores de circularidade apresentaram diferença estatística entre as médias para o tipo de alargador. Entretanto, os valores encontrados foram muito pequenos (mínimo de 0,30 μm) ficando abaixo da incerteza de medição do equipamento (aproximadamente 0,90 μm). A diferença das médias de circularidade entre os alargadores ficou em 0,15 μm .

A cilindricidade apresentou grande diferença estatística entre os alargadores, sendo o alargador 1 com melhor desempenho. Este alargador apresenta as guias mais largas e separadas da aresta de corte, conduzindo melhor a ferramenta através do furo. Nos gráficos 16 e 17 de comparação múltipla é possível analisar os resultados dos erros de forma.

GRÁFICO 16 – MÉDIAS DE CIRCULARIDADE (mm) DOS ALARGADORES

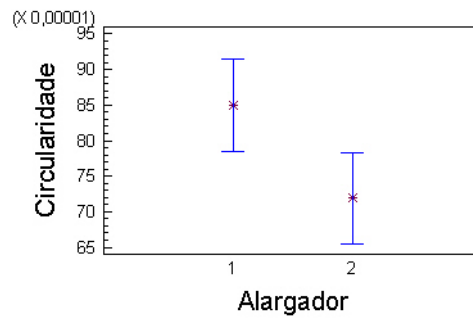
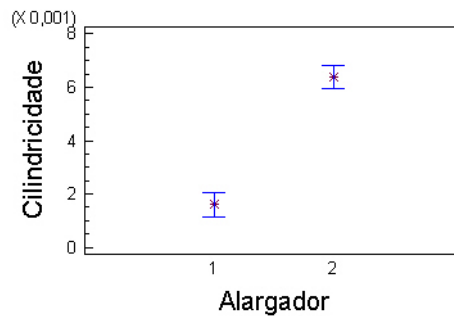


GRÁFICO 17 – MÉDIAS DE CILINDRICIDADE (mm) DOS ALARGADORES



4.2.2 Influência do Avanço

A variação do avanço apresentou pequena influência sobre os resultados dos desvios de circularidade dos furos alargados. Bezerra et al (2001) encontrou variação nos resultados de desvio de forma no alargamento de alumínio com o aumento do avanço, não apresentando nenhuma tendência. Nos gráficos 18 e 19, podem ser analisados os resultados.

GRÁFICO 18 – MÉDIAS DE CIRCULARIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO

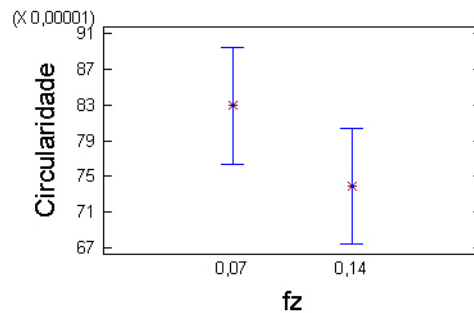
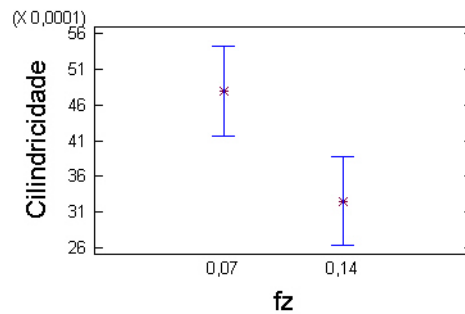


GRÁFICO 19 – MÉDIAS DE CILINDRICIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DO AVANÇO

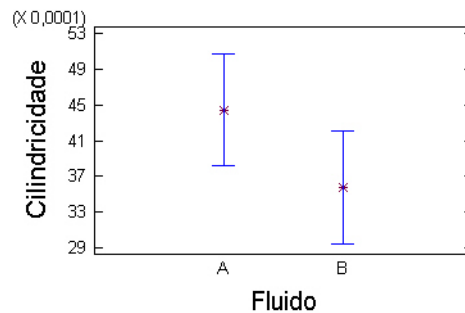


A cilindridade apresentou maior diferença estatística, sendo que houve a redução do valor de cilindridade para o maior avanço de 0,14 mm/z. Bezerra et al (2001), para o alargamento de alumínio com ferramenta multicortante, encontrou a tendência de aumento da cilindridade com o aumento do avanço a partir de um avanço de 0,04 mm/z até 0,16 mm/z. Entretanto, para avanços menores Bezerra et al (2001) encontrou resultados semelhantes ao deste trabalho.

4.2.3 Influência do Tipo de Fluido de Corte

O tipo de fluido de corte, estatisticamente, não tem influência sob os resultados de desvio de forma. As médias do fluido A e B, para a circularidade, foram praticamente iguais. No gráfico 20 pode ser visto as médias de cilindridade dos distintos fluidos de corte.

GRÁFICO 20 – MÉDIAS DA CILINDRICIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE

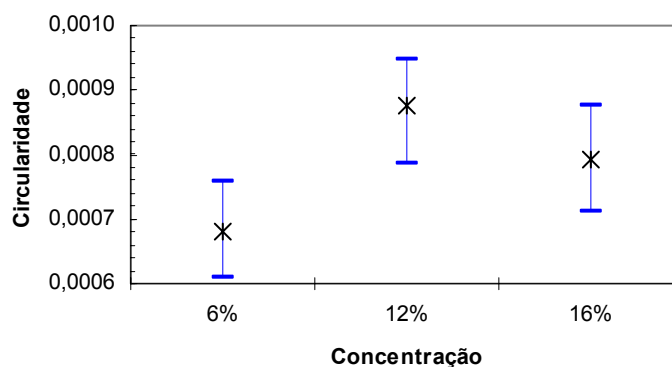


Os dois fluidos apresentaram a mesma tendência de circularidade. Para a cilindridade, o fluido B apresentou melhor desempenho.

4.2.4 Influência do Concentração do Fluido de Corte

A média do erro de cilindridade praticamente não variou com o aumento da concentração de material lubrificante no fluido de corte. A circularidade apresentou pequena variação com a alteração da concentração do fluido de corte, porém sem grande diferença estatística para a maior concentração. Contudo, o valor de concentração intermediário apresentou diferença estatística em relação à concentração mínima. No gráfico 21 é demonstrada a comparação múltipla do desvio de circularidade em relação à concentração do fluido de corte.

GRÁFICO 21 – MÉDIAS DE CIRCULARIDADE (mm) COM A VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE

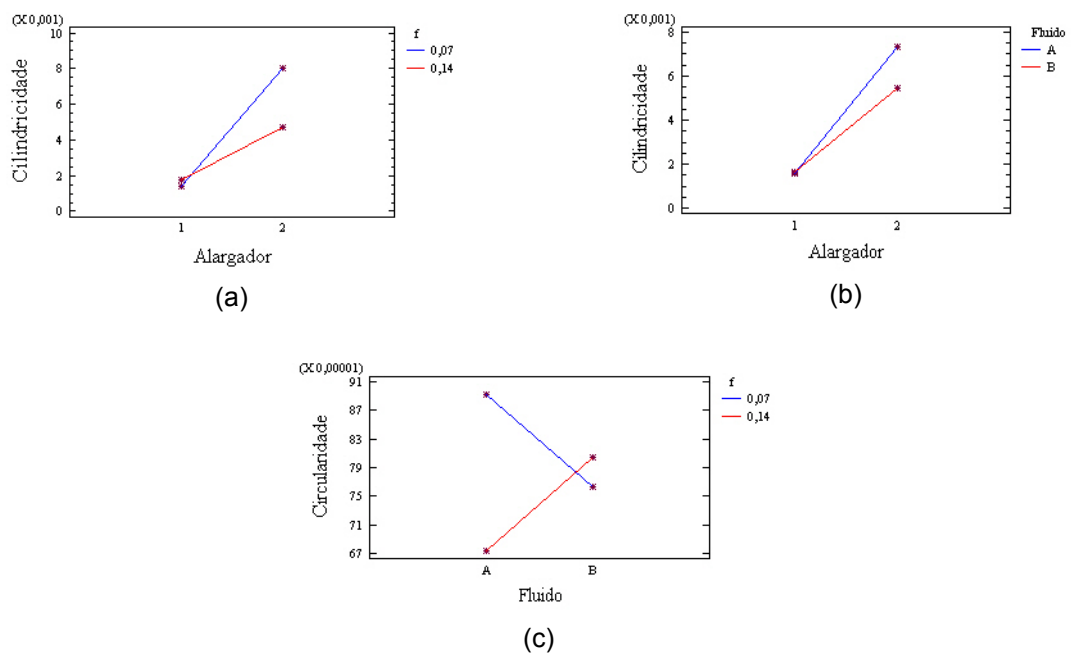


Não ocorreu interação estatisticamente significativa entre a concentração e o tipo de fluido de corte nos desvios de forma, o que implica na possibilidade de utilizar a menor concentração do fluido de corte para garantir um pequeno erro de forma.

4.2.5 Interações Significativas aos Desvios de Forma

Ocorreu interações significantes estatisticamente do tipo de alargador com os fluidos de corte e com os avanços para a cilindridade, e dos fluidos de corte com os avanços para a circularidade. Na fig. 28 pode-se visualizar os três gráficos de interação.

FIGURA 28 – GRÁFICOS DAS INTERAÇÕES ENTRE O TIPO DE ALARGADORE E AVANÇO (a); TIPO DE ALARGADORE E FLUIDO DE CORTE (b) – CILINDRICIDADE; E FLUIDO DE CORTE E AVANÇO (c) - CIRCULARIDADE



Os resultados de cilindridade do alargador 1 não apresentou diferenças com a variação do avanço e do fluido de corte. O alargador 2 apresentou maiores diferenças das médias de cilindridade com a variação do avanço e fluido de corte. Para a circularidade os fluidos têm comportamentos opostos, sendo que o fluido A apresentou maior diferença entre as médias com a variação do avanço.

4.3 MEDIDA DO DIÂMETRO

O diâmetro usinado foi medido em três seções do furo. Os resultados apresentados são as médias destes resultados. Os valores referem-se a diferença entre o diâmetro da ferramenta montada e o diâmetro medido.

Na tabela 5 é possível analisar a ANOVA para a variação do diâmetro dos furos.

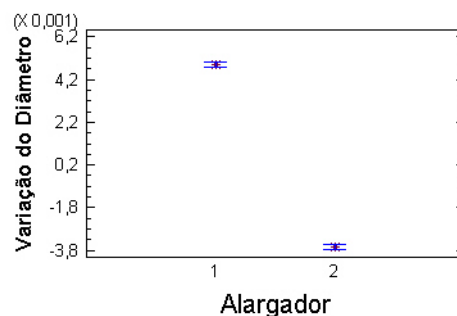
TABELA 5 – TABELA DA ANOVA PARA A VARIAÇÃO DO DIÂMETRO

Precisão Dimensional	Fator	GL	Soma dos Quadrados	Estatística F	Valor P
Variação do Diâmetro	Alargador	102	0,00192	5473,96	0
	Avanço	102	0,00192	0	0,9717
	Fluido	102	0,00192	0,01	0,9348
	Concentração	102	0,00192	0,01	0,9926

4.3.1 Influência do Tipo do Alargador

O tipo do alargador apresentou grande diferença estatística na variação do diâmetro do furo. No gráfico 22 é possível ver as média da variação do diâmetro.

GRÁFICO 22 – MÉDIAS DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS (mm) EM RELAÇÃO AOS ALARGADORES



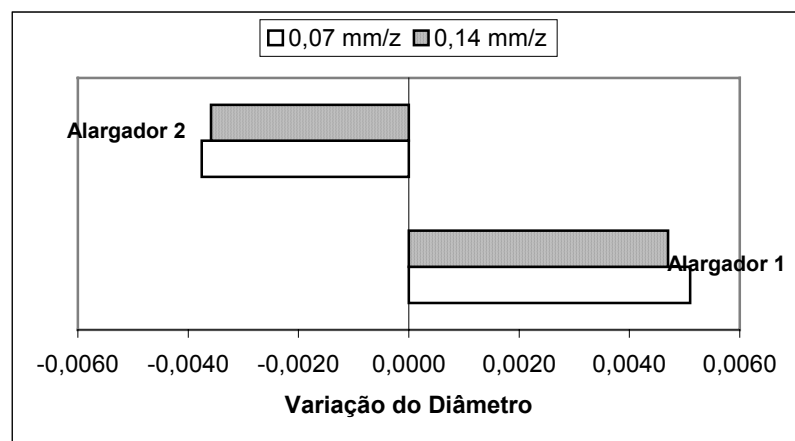
Podemos notar no gráfico que o alargador 1 aumentou o diâmetro do furo, em relação a ferramenta, em torno de 5 μm . Este comportamento era esperado

devido a excentricidade gerada pela folga entre a lâmina e as guias da ferramenta (ver fig. 4). O alargador 2 fechou o diâmetro do furo, em relação a ferramenta, em média $3,5 \mu\text{m}$. Este fato ocorreu devido à deformação elástica do material da parede dos furos, pois esta ferramenta foi fabricado em metal duro, o que não garante a afiação da aresta de corte como a ferramenta em PCD. Contudo, o alargador 1 possibilita a regulação do diâmetro podendo ter a sua regulação reduzida em até $0,010 \text{ mm}$ (Kress 1974).

4.3.2 Influência do Avanço

A mudança do avanço não apresentou diferença estatística na variação do diâmetro. Entretanto, a interação do avanço com o tipo de alargador apresentou significância estatística. No gráfico 23 é possível visualizar o comportamento do diâmetro dos furos com relação ao alargador e o avanço.

GRÁFICO 23 – VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS (mm) EM RELAÇÃO AO AVANÇO E AO TIPO DE ALARGADOR



Para ambos os alargadores o maior avanço mostrou resultados mais próximos ao valor de ajuste das ferramentas. Bezerra et al (2001) comenta que para o alargador convencional, com o maior avanço ocorre a aproximação do diâmetro do furo gerado com o diâmetro regulado no alargador, pois avanços pequenos aumentam o tempo de contato da ferramenta com as paredes do furo, o que geralmente o abrem. Schroeter (1989), encontrou a mesma tendência no alargamento de alumínio com ferramentas monocortantes.

4.3.3 Influência do Fluido de Corte e da Concentração do Fluido

A variação da concentração e o tipo de fluido de corte, não apresentaram influência estatisticamente significativa na variação do diâmetro dos furos alargados. Nos experimentos realizados por Schroeter (1989) para o alargamento em alumínio, foi encontrada grande dispersão nos valores do diâmetro dos furos (alargador monocortante) utilizando emulsão como fluido de corte.

4.3.4 Interações Significativas aos Desvios de Forma

Somente o tipo de alargador com a variação do avanço apresentou interação referente a variação do diâmetro dos furos alargados. Isto é decorrente do tipo de alargador, pois os mesmos apresentaram resultados opostos.

5. CONCLUSÕES

O processo de alargamento garante a produção de furos com grande precisão dimensional e ótimo acabamento superficial. Foram obtidos valores de até $0,58 \mu\text{m}$ de R_a , $0,30 \mu\text{m}$ de circularidade e $1,1 \mu\text{m}$ de cilindridade. Estes resultados são próximos aos encontrados por Schroeter (1989) e Eckhardt (1993). O alargador monocortante em PCD apresentou melhores resultados de R_z , R_t , cilindridade e precisão do diâmetro gerado (variação esperada). O alargador multicortante obteve melhor resultado da rugosidade média, e pequena vantagem nos valores de circularidade. Porém, esta ferramenta permite maiores velocidades de avanço (mm/min), reduzindo o tempo de corte (quatro vezes mais).

Assim, os resultados qualitativos encontrados se situaram em um patamar muito baixo, garantindo uma excelente performance das duas ferramentas, o que torna o alargador multicortante interessante devido ao menor tempo de corte.

O aumento do avanço resultou no aumento da rugosidade. O alargador multicortante apresentou melhora no desvio de forma com o aumento do avanço. Contudo, esta ferramenta não permite a troca das lâminas, como a ferramenta em PCD. Porém, existe a possibilidade de reafiação do alargador em metal duro, com o comprometimento do diâmetro. Uma alternativa é a aplicação de revestimento nas arestas de corte. Para o latão, pode-se utilizar TiN com uma camada de até $4 \mu\text{m}$ no diâmetro da ferramenta. A utilização de lâmina intercambiável no alargador 1 permite o ajuste do diâmetro com grande precisão. Além disto, o PCD realiza uma vida útil cinco vezes maior que o metal duro (sem afiações), tornando-o economicamente viável.

Para a obtenção dos resultados citados, a utilização de fluido de corte é imprescindível. Nos experimentos, os valores de rugosidade foram menores com a utilização do fluido com maior quantidade de óleo mineral (A). Desta forma, a lubrificação das guias das ferramentas tem fundamental importância na usinagem de furos de precisão. Para o desvio de forma e precisão do diâmetro, ambos os fluidos tiveram comportamento semelhante.

Os resultados referentes à variação da concentração dos fluidos de corte não alcançaram valores estatisticamente significantes, sendo que o melhor resultado foi para a precisão do diâmetro gerado, na qual a mínima concentração obteve a

maior variação do diâmetro do furo. Outro resultado foi a menor variação da rugosidade para a máxima concentração do fluido de corte. Entretanto, esperava-se melhores resultados com as maiores concentrações de material lubrificante. Desta forma, é possível utilizar uma concentração reduzida e alcançar bons resultados no alargamento de peças em latão, o que é economicamente interessante.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros, o alargamento de furos longos, como mancais do eixo-árvore de comando ou virabrequim; variando o tipo de fluido de corte podem contribuir para indústria. Na linha dos fluidos de corte, os resultados encontrados não apresentaram grandes diferenças estatísticas, o que remete a ensaios utilizando fluidos de corte de classes diferentes, como: óleo integral e solução sintética, ou, emulsão convencional e mínima quantidade de lubrificação. Vários autores recomendam a avaliação de um fluido de corte com a usinagem utilizando fluidos de diferentes classes.

A alteração da geometria da aresta de corte, bem como a largura das guias dos alargadores, podem fornecer informações importantes para o desenvolvimento de novos alargadores. O estudo da vida das ferramentas, como também a análise da integridade das superfícies usinadas é um possível foco para os estudos relacionado ao alargamento.

Um problema existente na indústria que pode gerar novos estudos é a variação do alinhamento do pré-furo com o eixo da ferramenta, podendo gerar variação na posição e piora na forma final do furo. Devido à pequena existência de corte frontal no processo de alargamento, o pré-furo tem grande influência na condução do alargador durante a usinagem.

REFERÊNCIAS

- AGARICO, J. O uso de alargadores na usinagem de materiais endurecidos. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n 440, p 36-45, set. 2002.
- ÁVILA, R. F.; ABRÃO, A. M. The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v 119, p 21-26, 2001.
- BATES, C. Now accepting applications for reamers. **American Machinist**, v 143, n 4, abr. 1999.
- BECK Gmbh. **Indexable insert tools for fine machining of bored holes – RB01/RB03**. Catálogo do Fabricante, 1996.
- BELLUCO, W., DE CHIFFRE, L. Surface integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils. **Tribology International**, v 35, n 12, p 865-870, dez. 2002.
- BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Correlation of cutting performance in different machining operations. **Annals of the CIRP**, 2001.
- BEZERRA, A. A.; MACHADO, A. R.; SOUZA, A. M.; EZUGWU, E. O. Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v 112, p 185-198, 2001.
- BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. Campinas: Unicamp, 2000. Apostila.
- CNOMO - Comité de normalisation des Moyines de Production. **Fascicule de formation etats de surface**. Grupos PSA Peugeot-Citroen e Renault, abr. 2000.
- DE CHIFFRE, L.; BELLUCO, W. Comparison of methods for cutting fluid performance testing. **Annals of the CIRP**, v 49/1, p 57-60, 2000.
- DE CHIFFRE, L.; BELLUCO, W. Investigation of cutting fluid performance using different machining operations. **Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers**, p 18-25, ago. 2002.
- ECKHARDT, M. **Utilização de alargadores de gume único regulável para a obtenção de furos de precisão**. Florianópolis, 1993. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
- ELLIOTT. **R-max reamers and fine boring tools**. Catálogo do Fabricante, 2003.
- FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. São Paulo: ABM, 1975. Apostila.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9ª reimpressão. São Paulo: Ed. Edgar Bluecher, v 1, 1995.

GROB. **Treinamento à clientes - operação e CNC. Comando siemens 840D**. São Paulo, 2000. Apostila.

HANNA. **Alargadores - reamers**. Catálogo do Fabricante, 2003.

HOLM, V. S. Óleos de base naftênica para aplicação em fluidos para processamento de metais. **Anais Usinagem 2002**, São Paulo, 2002.

IOWA WASTE REDUCTION CENTER. **Cutting fluid management for small machining operations**. University of Northern Iowa, 1996. Apostila.

JAIN, V. K.; SHUKLA, D. S. The role of fatty materials and water soluble inorganic solids in synthetic metal working fluid. **Wear**, v 208, p 11-16, 1997.

JP INDUSTRIE. **Formation Liquide de Coupe. Dossier usinage Shell**. Curitiba: Renault do Brasil, 2001. Apostila.

KENNAMETAL. **Rotating tools master catalogue 2003**. Catálogo do Fabricante.

KRESS, D. **El escariado con altas velocidades**. Stuttgart, 1974. Tese de Doutorado - Universidad de Stuttgart.

KRESS, D. A Usinagem de materiais endurecidos elimina retificação. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n 428, p 18-23, set. 2001.

LUGSCHEIDER, E.; KNOTEK, O.; BARIMANI, C.; LEVENDECKER, T.; LEMMER, O.; WENKE, R. Investigations on hard coated reamers in different lubricant free cutting operations. **Surface & Coatings Technology**, v 90, n 1-2, p 172-177, Mar. 1997.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica**. São Paulo: Ed. Érica, 2003. cap. 5.

MAPAL. **Competência em alargamento e mandrilamento de precisão**. Catálogo do Fabricante, 2003.

PAIN, J. **Réglage outil à patins de guidage**. Curitiba: Renault do Brasil, 2002. Relatório Técnico.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas Indústrias**. Cotia: Ed. Triboconcept, 1990.

SALES, W. F. **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte**. Uberlândia, 1999. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

SCHROETRER, R. B. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável**. Florianópolis, 1989. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

SECO. **Furação e alargamento – guia técnico**. Catálogo do Fabricante, 2002.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. New York: Ed. Oxford Science Publications, 1997.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**. 4ª edição. Florianópolis: Editora da UFSC, v1 e v2, 1995.

SUDA, S.; YOKOTA, H.; INASAKI, I.; WAKABAYASHI, T. A synthetic ester as an optimal cutting fluid for minimal quantity lubrication machining. **Annals of the CIRP**, v 51/1, p 95-98, 2002.

TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: I Seizure in metal cutting. **Wear**, v 128, p 29-25, 1988.

TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: II Movement of work material over the tool in metal cutting. **Wear**, v 128, p 47-64, 1988.

TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: III Temperatures in metal cutting. **Wear**, v 128, p 65-81, 1988.

WEINERT, K.; ADAMS F. J.; BIERMANN, D.; THAMKE, D. Alargadores de corte único: corte mais eficiente, além de vantagens econômicas. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n 392, p 38-57, jan. 1998.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Processos de usinagem e ferramentas de corte**. Florianópolis: UFSC, 2000. Apostila.

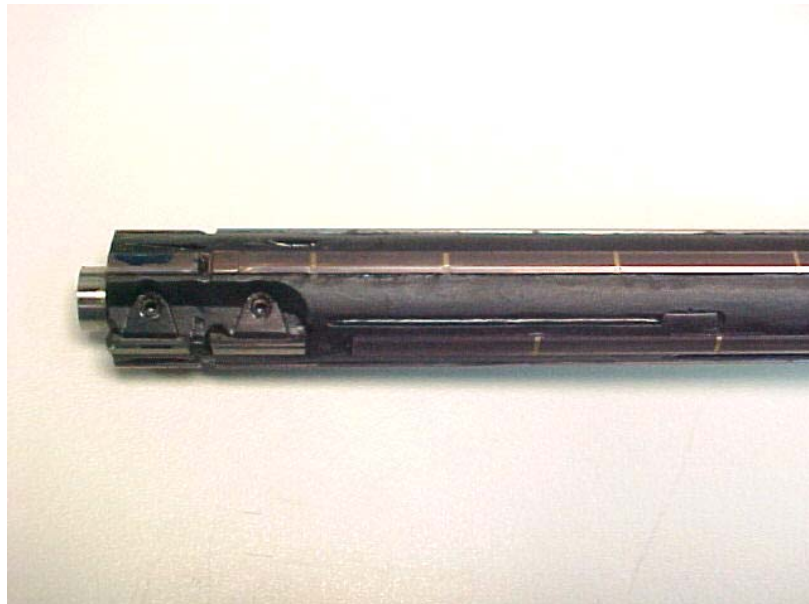
ZENG, Z.; BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. An investigation of reaming test parameters used for cutting fluid evaluations. **Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers**, v 57, p 24-28, jul. 2001.

ZENG, Z.; BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Evaluation of cutting fluids in multiple reaming of stainless steel. **Annals of the CIRP**, 2002.

APÊNDICE 1 – VÁRIOS TIPOS DE ALARGADORES



Alargadores em PCD brasados em haste fixa no cone HSK-63A por interferência térmica.



Ferramenta de aresta única de corte em dois estágios em PCD – usinagem do eixo-árvore de comando de válvulas.

APÊNDICE 2 – FERRAMENTAS UTILIZADAS NA CONFEÇÃO DO ALOJAMENTO DAS GUIAS DE VÁLVULAS



Ferramenta de Furação:

Broca de canal reto em metal duro, Ø 9,9 mm, com refrigeração interna.

$V_c = 190 \text{ m/min}$

$F_v = 0,15 \text{ mm/volta}$

$F_z = 0,075 \text{ mm/z}$

Pressão de refrigeração 25 bar



Ferramenta de alargamento do alojamento das guias de válvula:

Alargador em PCD com 4 arestas de corte, Ø 11 mm, com refrigeração interna.

$V_c = 210 \text{ m/min}$

$F_v = 0,3 \text{ mm/volta}$

$F_z = 0,075 \text{ mm/z}$

Pressão de refrigeração 25 bar

APÊNDICE 3 – TABELA COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

continua									
Fluido	Conc. Fluido	Alargador	fz (mm/z)	Δ diâmetro (mm)	Circularidade (mm)	Cilindricidade (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
A	6%	1	0,07	0,0052	0,0008	0,0014	0,108	0,750	0,915
A	6%	1	0,07	0,0052	0,0007	0,0012	0,100	0,713	0,825
A	6%	1	0,07	0,0053	0,0007	0,0012	0,105	0,732	0,879
A	6%	1	0,07	0,0055	0,0008	0,0011	0,113	0,851	1,052
A	6%	1	0,07	0,0054	0,0007	0,0014	0,116	0,777	0,931
A	6%	1	0,14	0,0046	0,0007	0,0015	0,129	0,908	1,075
A	6%	1	0,14	0,0043	0,0009	0,0018	0,124	0,881	1,012
A	6%	1	0,14	0,0045	0,0008	0,0016	0,131	1,003	1,253
A	6%	1	0,14	0,0040	0,0009	0,0018	0,124	0,908	1,052
A	6%	1	0,14	0,0040	0,0011	0,0023	0,125	0,917	1,026
A	6%	2	0,07	-0,0039	0,0006	0,0109	0,084	0,701	0,975
A	6%	2	0,07	-0,0028	0,0003	0,0084	0,058	0,849	1,571
A	6%	2	0,07	-0,0041	0,0006	0,0097	0,072	0,857	1,627
A	6%	2	0,07	-0,0034	0,0005	0,0105	0,069	1,086	1,841
A	6%	2	0,07	-0,0025	0,0010	0,0102	0,080	0,836	1,367
A	6%	2	0,14	-0,0046	0,0005	0,0085	0,071	0,803	1,378
A	6%	2	0,14	-0,0032	0,0004	0,0025	0,144	1,743	2,611
A	6%	2	0,14	-0,0046	0,0003	0,0085	0,088	1,028	1,832
A	6%	2	0,14	-0,0029	0,0007	0,0059	0,114	1,373	2,327
A	6%	2	0,14	-0,0038	0,0003	0,0039	0,123	1,670	2,425
A	12%	1	0,07	0,0046	0,0019	0,0026	0,112	0,817	0,967
A	12%	1	0,07	0,0053	0,0007	0,0014	0,100	0,692	0,815
A	12%	1	0,07	0,0053	0,0008	0,0015	0,105	0,757	0,940
A	12%	1	0,07	0,0054	0,0009	0,0014	0,109	0,832	1,058
A	12%	1	0,14	0,0050	0,0006	0,0014	0,130	0,924	1,058
A	12%	1	0,14	0,0043	0,0010	0,0022	0,130	1,003	1,255
A	12%	1	0,14	0,0047	0,0008	0,0013	0,132	1,016	1,390
A	12%	1	0,14	0,0052	0,0006	0,0012	0,123	0,929	1,009
A	12%	2	0,07	-0,0024	0,0025	0,0086	0,088	0,989	1,807
A	12%	2	0,07	-0,0040	0,0013	0,0085	0,075	0,716	1,044
A	12%	2	0,07	-0,0046	0,0004	0,0087	0,060	0,543	0,837
A	12%	2	0,07	-0,0046	0,0003	0,0096	0,076	0,741	1,225
A	12%	2	0,14	-0,0041	0,0003	0,0062	0,113	1,411	1,993
A	12%	2	0,14	-0,0032	0,0005	0,0084	0,127	1,821	2,754
A	12%	2	0,14	-0,0037	0,0010	0,0073	0,077	0,709	1,093
A	12%	2	0,14	-0,0043	0,0004	0,0042	0,138	1,737	2,350
A	16%	1	0,07	0,0054	0,0008	0,0017	0,110	0,763	1,011
A	16%	1	0,07	0,0051	0,0006	0,0021	0,129	0,955	1,554
A	16%	1	0,07	0,0059	0,0008	0,0013	0,106	0,716	0,893
A	16%	1	0,07	0,0060	0,0008	0,0013	0,127	0,913	1,311
A	16%	1	0,14	0,0049	0,0011	0,0021	0,145	1,108	1,374
A	16%	1	0,14	0,0046	0,0008	0,0012	0,124	0,918	1,122
A	16%	1	0,14	0,0043	0,0009	0,0014	0,126	0,919	1,145
A	16%	1	0,14	0,0046	0,0007	0,0012	0,124	0,895	1,133
A	16%	2	0,07	-0,0044	0,0011	0,0150	0,088	0,778	1,252
A	16%	2	0,07	-0,0046	0,0017	0,0091	0,072	0,753	1,161
A	16%	2	0,07	-0,0035	0,0007	0,0081	0,064	0,931	2,274

continuação

Fluido	Conc. Fluido	Alargador	fz (mm/z)	Δ diâmetro (mm)	Circularidade (mm)	Cilindricidade (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
A	16%	2	0,07	-0,0047	0,0012	0,0035	0,065	0,564	0,781
A	16%	2	0,14	-0,0037	0,0007	0,0050	0,127	1,627	2,251
A	16%	2	0,14	-0,0034	0,0005	0,0027	0,124	1,942	3,368
A	16%	2	0,14	-0,0029	0,0005	0,0023	0,093	1,359	2,438
A	16%	2	0,14	-0,0031	0,0005	0,0043	0,145	1,930	3,004
B	6%	1	0,07	0,0038	0,0007	0,0012	0,136	1,230	1,636
B	6%	1	0,07	0,0040	0,0007	0,0011	0,117	0,912	1,221
B	6%	1	0,07	0,0040	0,0008	0,0011	0,108	0,914	1,101
B	6%	1	0,07	0,0048	0,0007	0,0013	0,117	0,946	1,262
B	6%	1	0,14	0,0057	0,0014	0,0032	0,184	1,365	1,670
B	6%	1	0,14	0,0052	0,0006	0,0015	0,139	1,558	3,013
B	6%	1	0,14	0,0052	0,0007	0,0016	0,125	1,183	2,205
B	6%	1	0,14	0,0051	0,0009	0,0020	0,142	1,139	1,500
B	6%	2	0,07	-0,0039	0,0006	0,0043	0,148	1,463	1,832
B	6%	2	0,07	-0,0030	0,0006	0,0043	0,090	1,450	1,998
B	6%	2	0,07	-0,0024	0,0007	0,0082	0,090	1,431	1,939
B	6%	2	0,07	-0,0039	0,0007	0,0060	0,098	0,948	1,304
B	6%	2	0,14	-0,0033	0,0005	0,0021	0,133	1,866	2,992
B	6%	2	0,14	-0,0030	0,0007	0,0041	0,119	1,868	2,923
B	6%	2	0,14	-0,0042	0,0008	0,0046	0,093	1,441	2,539
B	6%	2	0,14	-0,0037	0,0004	0,0040	0,160	1,945	2,907
B	12%	1	0,07	0,0051	0,0006	0,0014	0,112	0,750	0,897
B	12%	1	0,07	0,0036	0,0016	0,0013	0,132	0,923	1,230
B	12%	1	0,07	0,0055	0,0006	0,0011	0,112	0,772	0,912
B	12%	1	0,07	0,0056	0,0008	0,0012	0,124	0,918	1,255
B	12%	1	0,14	0,0048	0,0009	0,0023	0,169	1,258	1,651
B	12%	1	0,14	0,0042	0,0011	0,0020	0,138	1,162	1,880
B	12%	1	0,14	0,0044	0,0009	0,0016	0,123	1,003	1,324
B	12%	1	0,14	0,0050	0,0011	0,0019	0,160	1,426	2,395
B	12%	2	0,07	-0,0040	0,0007	0,0022	0,102	1,244	1,573
B	12%	2	0,07	-0,0037	0,0014	0,0088	0,136	1,304	1,649
B	12%	2	0,07	-0,0044	0,0004	0,0061	0,107	1,016	1,274
B	12%	2	0,07	-0,0039	0,0007	0,0101	0,094	1,064	1,819
B	12%	2	0,14	-0,0040	0,0008	0,0031	0,137	1,857	2,731
B	12%	2	0,14	-0,0038	0,0007	0,0038	0,141	2,007	2,564
B	12%	2	0,14	-0,0033	0,0008	0,0029	0,143	2,211	4,363
B	12%	2	0,14	-0,0028	0,0009	0,0044	0,166	1,895	2,819
B	16%	1	0,07	0,0054	0,0009	0,0014	0,128	0,920	1,137
B	16%	1	0,07	0,0055	0,0007	0,0016	0,111	0,707	0,775
B	16%	1	0,07	0,0053	0,0009	0,0013	0,125	0,800	0,908
B	16%	1	0,07	0,0051	0,0008	0,0014	0,127	0,796	0,934
B	16%	1	0,07	0,0041	0,0008	0,0012	0,133	0,889	1,087
B	16%	1	0,14	0,0050	0,0011	0,0026	0,154	1,126	1,478
B	16%	1	0,14	0,0046	0,0007	0,0015	0,138	1,119	1,544
B	16%	1	0,14	0,0048	0,0007	0,0019	0,169	1,293	1,776
B	16%	1	0,14	0,0048	0,0007	0,0014	0,137	1,025	1,539
B	16%	1	0,14	0,0044	0,0007	0,0017	0,129	1,053	1,590
B	16%	2	0,07	-0,0032	0,0007	0,0026	0,058	0,631	0,934
B	16%	2	0,07	-0,0040	0,0006	0,0112	0,106	0,865	1,069
B	16%	2	0,07	-0,0042	0,0010	0,0092	0,116	1,027	1,236

conclusão

Fluido	Conc. Fluido	Alargador	fz (mm/z)	Δ diâmetro (mm)	Circularidade (mm)	Cilindricidade (mm)	Ra (μ m)	Rz (μ m)	Rt (μ m)
B	16%	2	0,07	-0,0036	0,0007	0,0036	0,079	0,812	1,316
B	16%	2	0,07	-0,0037	0,0004	0,0119	0,082	1,068	2,241
B	16%	2	0,14	-0,0037	0,0007	0,0076	0,116	1,551	3,129
B	16%	2	0,14	-0,0041	0,0013	0,0060	0,134	2,009	3,312
B	16%	2	0,14	-0,0027	0,0003	0,0040	0,144	1,842	2,485
B	16%	2	0,14	-0,0038	0,0007	0,0027	0,148	2,106	3,731
B	16%	2	0,14	-0,0033	0,0008	0,0036	0,128	1,473	2,859

**ANEXO 1 – RESULTADOS DA ANOVA PARA AS INTERAÇÕES (IMPRESSO DO
SOFTWARE STATGRAPHICS)**

Analysis of Variance for Ra - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	0,0113566	1	0,0113566	30,30	0,0000
B:fz	0,0226309	1	0,0226309	60,38	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00181141	1	0,00181141	4,83	0,0303
RESIDUAL	0,0371059	99	0,000374807		
TOTAL (CORRECTED)	0,0732628	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rz - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	3,1485	1	3,1485	48,21	0,0000
B:fz	5,91669	1	5,91669	90,60	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1,41334	1	1,41334	21,64	0,0000
RESIDUAL	6,46504	99	0,0653034		
TOTAL (CORRECTED)	16,959	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rt - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	16,2531	1	16,2531	70,86	0,0000
B:fz	17,0864	1	17,0864	74,49	0,0000
INTERACTIONS					
AB	3,84602	1	3,84602	16,77	0,0001
RESIDUAL	22,7082	99	0,229376		
TOTAL (CORRECTED)	59,8882	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Circularidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	4,31966E-7	1	4,31966E-7	4,07	0,0463
B:fz	2,13535E-7	1	2,13535E-7	2,01	0,1590
INTERACTIONS					
AB	3,50077E-7	1	3,50077E-7	3,30	0,0723
RESIDUAL	0,0000104991	99	1,06052E-7		
TOTAL (CORRECTED)	0,0000115019	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Cilindricidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	0,00059119	1	0,00059119	165,87	0,0000
B:fz	0,000056451	1	0,000056451	15,84	0,0001
INTERACTIONS					
AB	0,0000884633	1	0,000088463	24,82	0,0000
RESIDUAL	0,000352855	99	0,00000356419		
TOTAL (CORRECTED)	0,00108959	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Variação do Diâmetro - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	0,00188774	1	0,00188774	5756,01	0,0000
B:fz	3,53782E-7	1	3,53782E-7	1,08	0,3015
INTERACTIONS					
AB	0,00000200051	1	0,00000200051	6,10	0,0152
RESIDUAL	0,0000324681	99	3,2796E-7		
TOTAL (CORRECTED)	0,0019212	102			

Analysis of Variance for Ra - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	0,00988431	1	0,00988431	15,39	0,0002
B:Concentração	0,000239553	2	0,000119776	0,19	0,8302
INTERACTIONS					
AB	0,000715038	2	0,000357519	0,56	0,5749
RESIDUAL	0,0623002	97	0,00064227		
TOTAL (CORRECTED)	0,0732628	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rz - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	1,92553	1	1,92553	12,82	0,0005
B:Concentração	0,0740114	2	0,0370057	0,25	0,7821
INTERACTIONS					
AB	0,492271	2	0,246136	1,64	0,1995
RESIDUAL	14,5672	97	0,150177		
TOTAL (CORRECTED)	16,959	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rt - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	4,97088	1	4,97088	9,00	0,0034
B:Concentração	0,183918	2	0,0919591	0,17	0,8469
INTERACTIONS					
AB	1,37484	2	0,687421	1,24	0,2926
RESIDUAL	53,5699	97	0,552267		
TOTAL (CORRECTED)	59,8882	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Circularidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	1,42941E-9	1	1,42941E-9	0,01	0,9102
B:Concentração	5,58897E-7	2	2,79448E-7	2,50	0,0872
INTERACTIONS					
AB	7,74601E-8	2	3,873E-8	0,35	0,7079
RESIDUAL	0,000010835	97	1,11701E-7		
TOTAL (CORRECTED)	0,0000115019	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Cilindricidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	0,0000199406	1	0,0000199406	1,83	0,1797
B:Concentração	2,71178E-7	2	1,35589E-7	0,01	0,9877
INTERACTIONS					
AB	0,0000109576	2	0,00000547882	0,50	0,6069
RESIDUAL	0,00105882	97	0,0000109157		
TOTAL (CORRECTED)	0,00108959	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Variação do Diâmetro - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	1,65471E-7	1	1,65471E-7	0,01	0,9273
B:Concentração	3,28524E-7	2	1,64262E-7	0,01	0,9917
INTERACTIONS					
AB	1,36633E-7	2	6,83163E-8	0,00	0,9966
RESIDUAL	0,00192062	97	0,0000198002		
TOTAL (CORRECTED)	0,0019212	102			

Analysis of Variance for Ra - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	0,0117484	1	0,0117484	22,82	0,0000
B:Fluido	0,0101565	1	0,0101565	19,73	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,000517374	1	0,000517374	1,01	0,3185
RESIDUAL	0,050957	99	0,000514717		
TOTAL (CORRECTED)	0,0732628	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rz - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	3,07358	1	3,07358	25,55	0,0000
B:Fluido	1,76759	1	1,76759	14,69	0,0002
INTERACTIONS					
AB	0,165387	1	0,165387	1,37	0,2438
RESIDUAL	11,9092	99	0,120295		
TOTAL (CORRECTED)	16,959	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rt - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	15,927	1	15,927	40,30	0,0000
B:Fluido	4,6346	1	4,6346	11,73	0,0009
INTERACTIONS					
AB	0,0322329	1	0,0322329	0,08	0,7758
RESIDUAL	39,1283	99	0,395236		
TOTAL (CORRECTED)	59,8882	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Circularidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	4,34535E-7	1	4,34535E-7	3,89	0,0514
B:Fluido	2,31683E-10	1	2,31683E-10	0,00	0,9638
INTERACTIONS					
AB	2,94303E-9	1	2,94303E-9	0,03	0,8714
RESIDUAL	0,0000110651	99	1,11768E-7		
TOTAL (CORRECTED)	0,0000115019	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Cilindricidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	0,000590128	1	0,000590128	129,04	0,0000
B:Fluido	0,0000213643	1	0,0000213643	4,67	0,0331
INTERACTIONS					
AB	0,0000245953	1	0,0000245953	5,38	0,0224
RESIDUAL	0,000452765	99	0,00000457338		
TOTAL (CORRECTED)	0,00108959	102			

Analysis of Variance for Variação do Diâmetro - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Alargador	0,00188557	1	0,00188557	5420,20	0,0000
B:Fluido	3,89947E-9	1	3,89947E-9	0,01	0,9159
INTERACTIONS					
AB	3,61249E-7	1	3,61249E-7	1,04	0,3107
RESIDUAL	0,00003444	99	3,47879E-7		
TOTAL (CORRECTED)	0,0019212	102			

Analysis of Variance for Ra - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	0,00968924	1	0,00968924	23,69	0,0000
B:fz	0,0227885	1	0,0227885	55,73	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00000702271	1	0,00000702271	0,02	0,8960
RESIDUAL	0,040483	99	0,000408919		
TOTAL (CORRECTED)	0,0732628	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rz - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	1,75323	1	1,75323	18,82	0,0000
B:fz	5,83995	1	5,83995	62,70	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0872585	1	0,0872585	0,94	0,3354
RESIDUAL	9,2207	99	0,0931384		
TOTAL (CORRECTED)	16,959	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Rt - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	4,57796	1	4,57796	12,47	0,0006
B:fz	16,8603	1	16,8603	45,93	0,0000
INTERACTIONS					
AB	1,98874	1	1,98874	5,42	0,0220
RESIDUAL	36,3388	99	0,367059		
TOTAL (CORRECTED)	59,8882	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Circularidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	3,89947E-11	1	3,89947E-11	0,00	0,9850
B:fz	2,07092E-7	1	2,07092E-7	1,89	0,1725
INTERACTIONS					
AB	4,31966E-7	1	4,31966E-7	3,94	0,0499
RESIDUAL	0,0000108568	99	1,09665E-7		
TOTAL (CORRECTED)	0,0000115019	102			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Analysis of Variance for Cilindricidade - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	0,0000191415	1	0,0000191415	1,88	0,1729
B:fz	0,0000605641	1	0,0000605641	5,96	0,0164
INTERACTIONS					
AB	0,00000367222	1	0,00000367222	0,36	0,5490
RESIDUAL	0,0010054	99	0,0000101555		
TOTAL (CORRECTED)	0,00108959	102			

Analysis of Variance for Variação do Diâmetro - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Fluido	1,37761E-7	1	1,37761E-7	0,01	0,9330
B:fz	1,85531E-8	1	1,85531E-8	0,00	0,9754
INTERACTIONS					
AB	0,00000237782	1	0,00000237782	0,12	0,7269
RESIDUAL	0,00191868	99	0,0000193806		
TOTAL (CORRECTED)	0,0019212	102			